INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



ENERGIA FOTOVOLTAICA

Junio 1987

450 Ptas.
(IVA incluido)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 129
Junio 1987



8 **ARMAS NUCLEARES DE TERCERA GENERACION, Theodore B. Taylor**
Podrán seleccionar el tipo de energía que liberen y concentrar un haz sobre blancos tácticos.

20 **RESPUESTA DE LOS FOTORRECEPTORES A LA LUZ, Julie L. Schnapf y Denis A. Baylor**
Los bastones de la retina llegan a captar y transformar en señal eléctrica un solo fotón.

30 **LOS SATELITES DE URANO, Torrence V. Johnson, Robert Hamilton Brown y Laurence A. Soderblom** El *Voyager 2* contó 15. Tres parecen haber vivido un turbulento pasado.

50 **TERAPIA ANTIVIRICA, Martin S. Hirsch y Joan C. Kaplan**
Un ingenioso ardid molecular para matar los virus sin lesionar a las células hospedadoras.

64 **ENERGIA FOTOVOLTAICA, Yoshihiro Hamakawa**
Dentro de 15 años entrarán en servicio centrales solares generadoras de hasta un megawatt.

72 **LA RADIACION DE LA VIDA ANIMAL, Mark A. S. McMenamin**
Hace 570 millones de años se diversificó a un ritmo sin precedentes. ¿A qué fue debido?

82 **ACUSTICA DE LAS ANTIGUAS CAMPANAS CHINAS, Sinyan Shen**
Los juegos de campanas de bronce constituyeron importantes instrumentos de orquesta.

92 **EL GEN DE LA HISTONA H1, Jovita Mezquita Pla**
Determina la proteína responsable principal de la organización espacial de la cromatina.

3 AUTORES

4 HACE...

46 CIENCIA Y SOCIEDAD

102 JUEGOS DE ORDENADOR

107 TALLER Y LABORATORIO

113 LIBROS

116 BIBLIOGRAFIA

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCION Carlos Oppenheimer, José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S.A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCION Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, John M. Benditt, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, Robert Kunzig, James T. Rogers, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTISTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCION Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

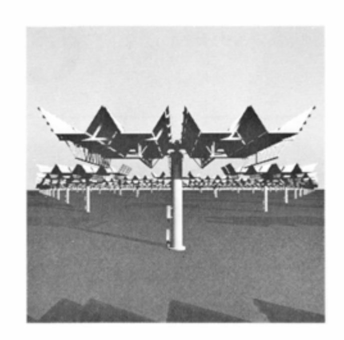
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Josep-Enric Llebot Rabagliatti: *Armas nucleares de tercera generación*; Ana García García: *Respuesta de los fotorreceptores a la luz*; Manuel Puigcerver: *Los satélites de Urano*; Isabel García Acha y Julio Rodríguez Villanueva: *Terapia antivírica*; Manuel Bandrés Merino: *Energía fotovoltaica*; Elisa Villa Otero: *La radiación de la vida animal*; Andrés Lewin Richter: *Acústica de las antiguas campanas chinas*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Francesc Asensi, Luis Alonso, José María Tous y Eusebio Bernabeu



PORTADA

La ilustración de la portada muestra parte de la mayor central fotovoltaica, instalación, de 7,2 megawatt, que ocupa una superficie de 65 hectáreas en Carissa Plains, California (véase "Energía fotovoltaica", por Yoshihiro Hamakawa, en este número). Las células solares fotovoltaicas, que se fabrican con silicio cristalino, convierten directamente la energía solar en electricidad. Grupos de células solares cableadas en fábrica forman módulos: cada panel consta de 16 de éstos. La central californiana fue construida en menos de un año por ARCO Solar, Inc. y Pacific Gas & Electric Company.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Ted Lodigensky

Página	Fuente
8-18	Hank Iken
21	Scott Mittman y Maria T. Maglio
22	Carol Donner
23-24	Alan D. Iselin
25	Julie L. Schnapf y Denis A. Baylor
26-27	Alan D. Iselin
31	Servicio Geológico de los Estados Unidos, Flagstaff, Arizona
32	George Retseck
33	Jet Propulsion Laboratory, Instituto de Tecnología de California (*izquierda*); George Retseck (*derecha*)
34	Jet Propulsion Laboratory
35	Servicio Geológico de los Estados Unidos
36	Jet Propulsion Laboratory
37	Servicio Geológico de los Estados Unidos
38	Jet Propulsion Laboratory
39	Servicio Geológico de los Estados Unidos
40	George Retseck (*izquierda*), Jet Propulsion Laboratory (*derecha*)
41	Servicio Geológico de los Estados Unidos
42	George Retseck (*arriba*), Jet Propulsion Laboratory (*abajo*)
51	David Ho, Cedars-Sinai Medical Center
52-61	Thomas C. Moore
65	Sanyo Electric Co., Ltd.
66-70	Gabor Kiss
73	J. Wyatt Durham
74-76	Tom Prentiss
77	Mark A. S. McMenamin
78	Mark A. S. McMenamin (*arriba*), Servicio Geológico del Canadá, Ottawa (*abajo*)
79-80	Tom Prentiss
82-83	Chinese Music Society of North America
84	Andrew Christie
85	Chinese Music Society of North America
86-88	Andrew Christie
89	Andrew Christie (*arriba*), Chinese Music Society of North America (*abajo*)
90	Andrew Christie
93-100	Jovita Mezquita y Magda Mària
102	Edward Bell
103	Music Publishing Services, New York
104	Edward Bell
105	Music Publishing Services
108-112	Michael Goodman

ISSN 0210-136X — Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

THEODORE B. TAYLOR ("Armas nucleares de tercera generación") preside la compañía NOVA, que investiga y desarrolla técnicas en el campo de las fuentes de energía renovables. Licenciado por el Instituto de Tecnología de California en 1945, en 1954 se doctoró en física teórica por la Universidad de Cornell; en el ínterin estuvo en la Universidad de California en Berkeley y en el Laboratorio Científico de los Alamos, donde colaboró en el diseño de armas nucleares. Desde 1956 hasta 1964 trabajó en la División General Atómica de la General Dynamics y, desde 1964 hasta 1966, dirigió la Defense Atomic Support Agency, la actual Defense Nuclear Agency. Fundó la International Research and Technology Corporation. Taylor accedió a su cargo actual en 1980, tras cuatro años como profesor invitado con el rango de catedrático de mecánica e ingeniería espacial en Princeton.

JULIE L. SCHNAPF y DENIS A. BAYLOR ("Respuesta de los fotorreceptores a la luz") vienen colaborando desde que Schnapf era alumna de postdoctorado del laboratorio de Baylor, en la Universidad de Stanford. Schnapf comenzó su formación en la Universidad de Rochester, recibiéndose de doctor por la de Washington. Pasó por el Instituto Nacional de la Salud y la Universidad de California en San Francisco. Recientemente se ha incorporado al claustro docente de este último centro superior en calidad de profesora de prevención de la ceguera. Baylor se interesó por la neurofisiología en la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, por la que se licenció en medicina después de haberse diplomado por el Knox College. Tras cumplir su contrato con la Facultad de Medicina de la Universidad de Colorado en Denver, se trasladó a Stanford, donde, desde 1978, enseña neurobiología.

TORRENCE V. JOHNSON, ROBERT HAMILTON BROWN y LAURENCE A. SODERBLOM ("Los satélites de Urano") pertenecen al grupo de elaboración de imágenes del proyecto Voyager. Johnson y Brown, especialistas en planetas, trabajan en el Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto de Tecnología de California; Soderblom se halla adscrito a la sección de astrogeología del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Johnson cursó la carrera en la Universidad de Washington en San Luis y se doctoró por el Instituto de Tecnología de California (Caltech). Es investigador de número del Laboratorio de Propulsión a Chorro y colaborador científico de la misión *Galileo* a Júpiter. Brown se diplomó y licenció en física por la Universidad de Purdue, doctorándose en astronomía por la de Hawai. Ha efectuado numerosas observaciones telescópicas de los satélites de Urano. Soderblom se doctoró en planetología y geofísica por el Caltech. Es supervisor de los aspectos físicos de la sección de astrogeología del Servicio Geológico y participa en la misión *Mars Observer*.

MARTIN S. HIRSCH y JOAN C. KAPLAN ("Terapia antivírica") son profesores de la Facultad de Medicina de Harvard y trabajan también en el Hospital General de Massachusetts. del que Hirsch es médico adjunto y Kaplan bacterióloga adjunta. Hirsch cursó el primer ciclo de carrera en el Hamilton College y se licenció en medicina por la Universidad Johns Hopkins. Realizó prácticas de postdoctorado en la Universidad de Chicago, en los Centros de Control de Enfermedades de Atlanta y en el Instituto Nacional británico de Investigaciones Médicas, de Londres. Desde 1969 es miembro de la Unidad de Enfermedades Infecciosas del Hospital General de Massachusetts. Kaplan se integró en el claustro docente de la Facultad de Medicina de Harvard en 1971, tras desarrollar en ese centro trabajos de postgraduada. Procede de las universidades de McGill y Brandeis. Ha investigado la reparación del ADN en mamíferos, la activación de los virus y el SIDA.

YOSHIHIRO HAMAKAWA ("Energía fotovoltaica") enseña ingeniería eléctrica en la Universidad de Osaka, a la que pertenece desde que se recibió de doctor por esa institución, en 1964. Ha sido también profesor visitante de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, en cuyo departamento de ingeniería eléctrica y laboratorio de investigación de materiales ha trabajado. Se ha dedicado a la física de los semiconductores, la optoelectrónica y la conversión fotovoltaica.

MARK A. S. McMENAMIN ("La radiación de la vida animal") es profesor ayudante de geología del Mount Holyoke College. Licenciado en geología por la Universidad de Stanford, trabajó durante cinco años para el Servicio Geológico de los Estados Unidos. Se recibió de doctor por la Universidad de California en Santa Bárbara. Ha intervenido en numerosas campañas de Alaska y Suecia, entre otros lugares.

SINYAN SHEN ("Acústica de las antiguas campanas chinas") dirige las investigaciones sobre materiales, combustibles de fuentes renovables y acústica industrial del Laboratorio Nacional Argonne. Se diplomó por la Universidad de Singapur y se licenció y doctoró por la estatal de Ohio. Es inventor de una sordina para instrumentos de cuerda y ha patentado detectores sonoros para aplicaciones industriales. Le han interesado también los nuevos materiales estructurales y la conversión de la biomasa, y participa activamente en la difusión de las nuevas tecnologías. Preside la Sociedad de Música China de América del Norte.

JOVITA MEZQUITA PLA ("El gen de la histona H1") es profesora titular del Departamento de Fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Barcelona y dirige la sección de ácidos nucleicos instalada en el laboratorio de "Fisiología del Nucli Cel.lular" del citado departamento. Realizó los estudios de licenciatura y doctorado en la Facultad de Medicina de la Universidad de Barcelona. Las investigaciones de su tesis doctoral versaron sobre el significado evolutivo de ciertas formas de isoenzimas. De 1982 a 1985 desarrolló el proyecto de investigación sobre los genes de las histonas en el departamento de bioquímica médica de la Universidad Canadiense de Calgary, bajo la dirección del profesor G. H. Dixon. Ha sido becaria de la Fundación Juan March y de la Alberta Heritage Foundation.

Hace…

José M.ª López Piñero

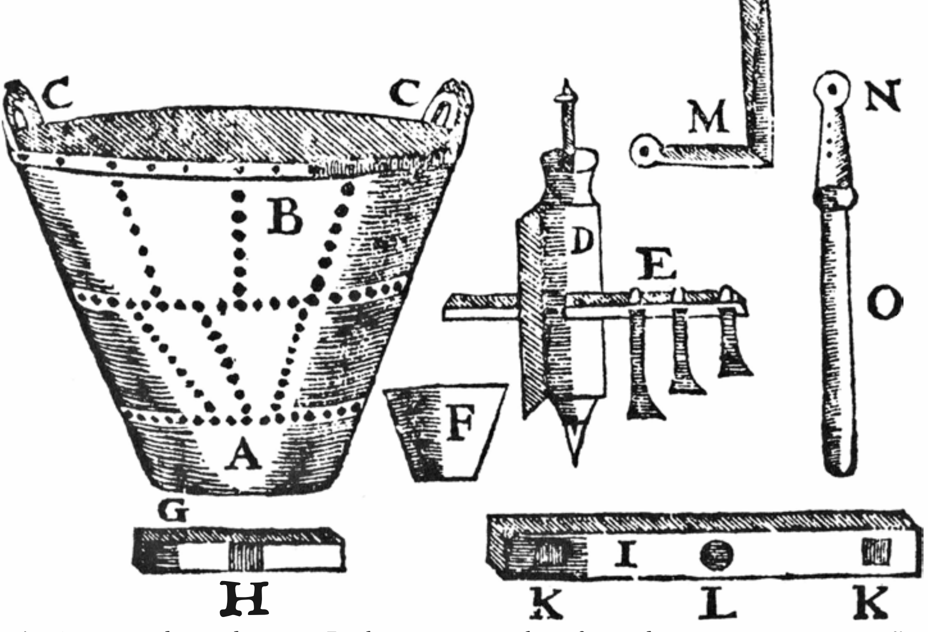
…trescientos cincuenta años

El *Arte de los metales*, de Alvaro Alonso Barba, fue aprobado por los diputados de Potosí y remitido al rey por Juan de Lizarazu, presidente de la Real Audiencia de Charcas. Se trata de uno de los grandes títulos de la historia de la minerometalurgia, que ha merecido un notable número de trabajos y es de cita obligada para los historiadores especializados españoles y extranjeros. Sin embargo, no había sido analizado en profundidad hasta los recientes estudios de Eugenio Portela, en los que vamos a basar principalmente esta breve noticia.

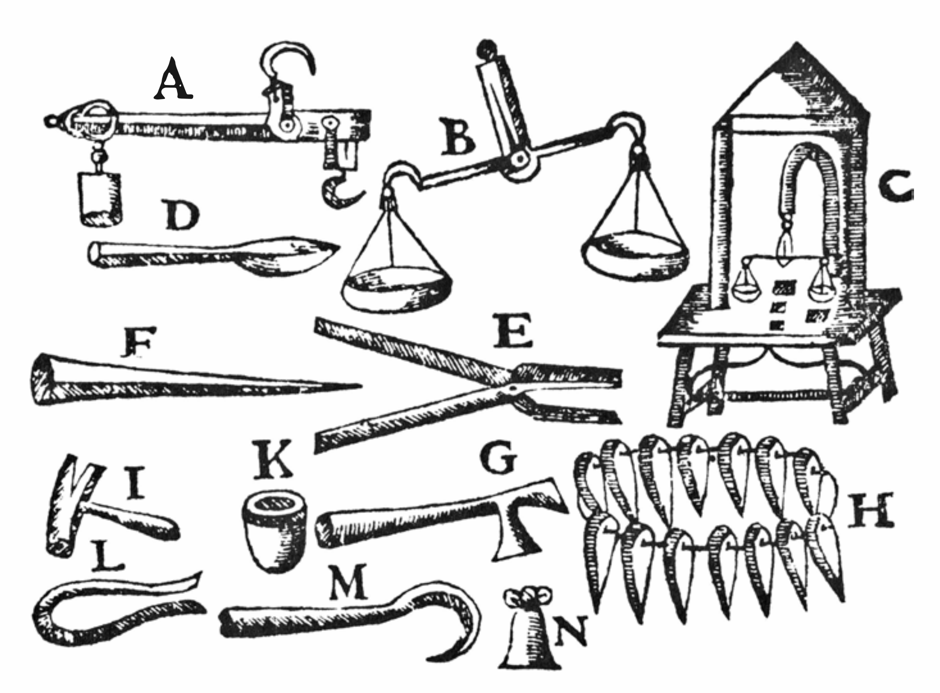
Alvaro Alonso Barba nació en la villa onubense de Lepe en 1569. Siguió la carrera eclesiástica y, tras ser ordenado sacerdote, se trasladó a América con anterioridad a 1588. En 1590 estaba en la población de Tarabusco, en la provincia de los Charcas de la actual Bolivia, puesto que en dicha fecha descubrió allí el beneficio por "cazo y cocimiento". Luego residió en Tiahuanaco, Oruro y desde 1617 a 1624 en diferentes pueblos de la comarca de los Lipes. En todos estos lugares simultaneó sus deberes eclesiásticos con la exploración de los yacimientos de la región, la realización de numerosos ensayos y experiencias, e incluso la dirección de haciendas de beneficio. Su fama hizo que en 1624 fuera llamado a Potosí por Juan de Lizarazu, "para poder comunicar con él sobre el beneficio de los metales". Allí residió Barba durante más de tres decenios. Lizarazu le encargó "con repetidas instancias sacase a luz un libro en que se enseñase científicamente lo que en el beneficio de los metales se practicaba… sin ninguna regla cierta". El *Arte de los metales* fue aprobado, como hemos adelantado, por los diputados de Potosí en 1637 y remitido al rey por el propio Lizarazu. Tras las correspondientes aprobaciones, fue impreso por vez primera en Madrid el año 1640.

La mayor parte de los autores que se han ocupado de Barba carecen de noticias acerca de su biografía con posterioridad a la publicación del *Arte de los metales*. Un especialista de la talla de Cyril Stanley Smith afirma en el *Dictionary of Scientific Biography* que "seguramente murió en Potosí algún tiempo después de 1639". No obstante, José Toribio Medina había dado ya a conocer su residencia en España entre 1657 y 1662, noticia que después reprodujeron Carreño, Bargalló y otros autores. Los detalles de esa etapa final de su vida han sido posteriormente aclarados en un reciente estudio de José María Barnadas. Barba intentó volver a España a partir de 1649, pero hasta 1657 no fue autorizado su regreso. Interesado en principio por los minerales de plata de la zona de Niebla, realizó después numerosos viajes por la península, en compañía de dos expertos en minerometalurgia que le habían ayudado en América. Efectuó nuevas indagaciones e incluso obtuvo permiso para estudiar el aprovechamiento de las escorias de Zalamea la Real y Río Tinto, con un método por el que se interesarían los explotadores ingleses el siglo siguiente. No obstante, se sintió cada vez más desmoralizado ante la falta de comprensión de las cuestiones técnicas, sobre todo en el ambiente de la Corte. A pesar de su avanzada edad, solicitó de nuevo volver a América, pero falleció en Sevilla el año 1662, poco después de ser autorizado para el viaje. Su testamento, descubierto por Barnadas, da noticia de los instrumentos que había reunido durante su estancia en la península, así como de ciento cincuenta libros que seguramente eran sólo parte de la biblioteca que poseía en América.

El *Arte de los metales* consta de cinco libros. El primero se ocupa de la descripción y la generación de los metales y otros "mixtos". Es una especie de introducción consagrada a los fundamentos doctrinales y está redactado en un estilo enciclopédico que contrasta con el resto de la obra. Portela subraya que contiene tres cuartas partes de las citas que ésta incluye. Entre ellas se encuentran referencias, no solamente a los autores antiguos y medievales, así como a Paracelso, Agrícola, Cardano, Porta, etc., sino también otra relativa al descubrimiento de los satélites de Júpiter por Galileo. Barba tiene una actitud muy crítica ante los clásicos, cuyos esquemas considera insuficientes para dar razón de los nuevos hechos, y estima que la experiencia es el único criterio válido. La afirmación de Rey Pastor acerca de su "alejamiento del movimiento científico más reciente, que por entonces fructificaba en Alemania con la gran figura de Agrícola", sólo resulta explicable por su desconoci-



1. Aparato diseñado por Barba para su "beneficio de cazo y cocimiento": "A. Fondo de una pieza. B. Caldera de piezas. C. Asas. D. Molinete. E. Una de sus cuatro aspas, con dientes desiguales. F. Paño de que se hacen las calderas. G. Vara de cobre con el dado sobre el que anda el molinete. H. El dado. I. La puente. K. Agujeros para las asas. L. Agujero por donde entra el molinete. M. Seguiñuela. N. Anillo de hierro. O. Su cabo de Palo."



2. *"Instrumentos que ha de tener el fundidor", según el* Arte de los metales*: "A. Romana. B. Peso grande. C. Peso pequeño. D. Cuchara. E. Tenazas. F. Hierro largo. G. Hachuela. H. Puntas. I. Martillo. K. Crisol. L. Muelle. M. Garabato. N. Taxadera."*

miento de la obra de Barba y en general de la historia de la minerometalurgia, combinado con la mitificación de la ciencia centroeuropea propia del ambiente español de su época. Recuérdese únicamente la fecha de publicación del célebre tratado de Agrícola que en modo alguno puede ser considerado como expresión de una orientación científica "moderna". Sin demasiado interés por las cuestiones teóricas, Barba rechaza la opinión de los "filósofos", negando la inmanencia de las especies y defendiendo la teoría del origen alquímico según la cual el azufre y el mercurio constituyen la materia de los metales. Por otra parte, denuncia agriamente el abandono de las minas americanas de metales no preciosos, por culpa de solamente "buscar riquezas de oro y plata", que "ciegan los ojos y el discurso".

Los otros cuatro libros son de carácter muy distinto. El segundo está consagrado al beneficio de los metales de plata por amalgamación. "Se trata –dice Portela– de una exposición original, fruto de la experiencia de un hombre práctico, testigo y actor de una técnica." Estudia las distintas fases del proceso, reflexionando sobre su marcha y dando las indicaciones prácticas necesarias para solucionar las dificultades. Destaca especialmente la reiteración de pruebas analíticas de control, así como la puesta en práctica de procesos piloto para verificar las condiciones a las que tendrá que ajustarse el proceso industrial para mejorar su rendimiento. En ello precisamente cifra Portela la modernidad de la orientación tecnológica de Barba. Semejante es la opinión de Cyril Stanley Smith, que afirma que "fue uno de los primeros tratadistas que propugnó someter al control de laboratorio todo un proceso industrial, así como estimar todos los costos (incluyendo combustible, mercurio, aditivos, desgaste del equipo y trabajo) antes de acometer una operación".

El libro tercero expone el procedimiento por "cazo y cocimiento", ideado por Barba para beneficiar metales de oro, plata y cobre. El cuarto está dedicado a la fundición de metales y el quinto a su refinación y separación. El contenido y el estilo de todos son coherentes con los del libro segundo.

El tratado de Barba, reimpreso en 1680, fue reeditado tres veces en la España del siglo XVIII y durante la centuria pasada y la actual ha vuelto a ser publicado en seis ocasiones en diferentes localidades de Iberoamérica y España. Lo más notable, sin embargo, es la difusión conseguida por sus traducciones a otros idiomas y su prolongada vigencia, que alcanzó hasta la constitución de la química moderna. Tuvo, en efecto, cuatro ediciones en inglés entre 1670 y 1740, ocho en alemán entre 1676 y 1767, y cuatro en francés entre 1729 y 1752. En el año 1923 se publicó, además, una nueva traducción inglesa.

Armas nucleares de tercera generación

A diferencia de las armas nucleares desplegadas hoy, que dispersan su energía explosiva indiscriminadamente, las armas nucleares del futuro podrán seleccionar el tipo de energía para concentrarlo en los blancos

Theodore B. Taylor

A comienzos de los años cincuenta, los laboratorios norteamericanos dedicados a la investigación de armamentos alcanzaron cotas de altísimo rendimiento. No sólo consiguieron avances cualitativos en la eficacia de las bombas de fisión, que constituían la primera generación de armas nucleares, sino que desarrollaron también la segunda generación de armas nucleares al domeñar la potencia explosiva de la fusión creando la bomba de hidrógeno y sus diversas familias. Hacia las postrimerías de esa década, las ojivas nucleares del arsenal estadounidense se parecían muy poco a los proyectiles que habían iniciado la era atómica en Hiroshima y Nagasaki.

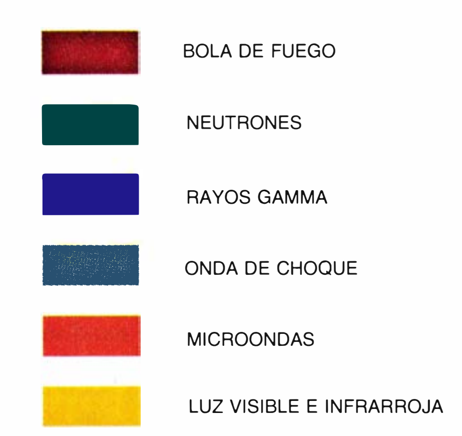
La técnica actual permite ya hablar de la tercera generación de armas nucleares. Alterando la forma del explosivo nuclear y manipulando otras características de su diseño, se podrían construir ingenios que generaran y dirigiesen haces de radiación, pequeñas partículas o bolas metálicas contra rampas de lanzamiento de misiles, misiles en vuelo o naves espaciales. Por mor de comparación, y ateniéndonos a su eficacia militar, la técnica de esas nuevas armas sería a la de las armas nucleares convencionales lo que el rifle a la pólvora.

La generosa inversión financiera y el firme apoyo gubernamental a los laboratorios implicados en el desarrollo de nuevas armas explica la eclosión creadora que produjo las dos primeras generaciones de armas nucleares . En aquel momento, quizás el factor más estimulante fuera simplemente la exaltación que experimenta el científico y el ingeniero cuando tienen libertad de explorar nuevos conceptos técnicos y convertirlos luego en realidad. La Iniciativa de Defensa Estratégica, que auspicia un vigoroso programa militar de investigación y desarrollo, podría generar, en los laboratorios estadounidenses, condiciones semejantes a las de los años cincuenta. El desafío que conlleva tal intimidación tecnológica, implícita en la llamada del presidente Reagan a una búsqueda de defensa contra los misiles balísticos, es probable que conduzca a los ingenieros a considerar nuevos tipos de armas nucleares, aparte del propio desarrollo de nuevos sistemas de respuesta, mando y control.

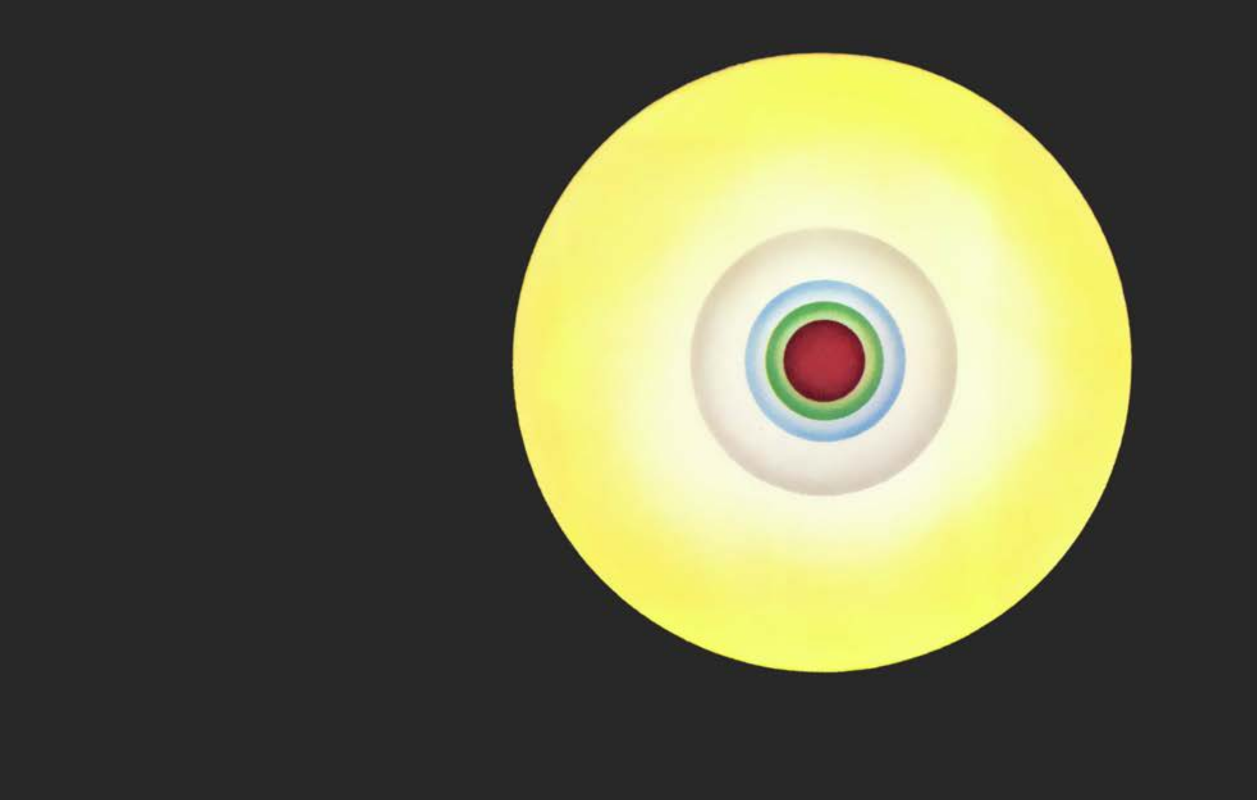
Sería lógico pensar que el ingeniero fundara sus diseños sobre el legado de las armas nucleares de la primera y la segunda generación; todas ellas utilizan como principio básico la conversión de masa en energía que, posteriormente, disipan uniformemente por el entorno con la forma esférica característica. La nueva generación de armas nucleares podría intensificar o suprimir selectivamente ciertos tipos de energía, de la cantidad ingente que se produce en una explosión nuclear. Además, los efectos letales causados por un determinado portador de energía (radiación electromagnética, partículas subatómicas o material sólido) podrían incrementarse también modificando la trayectoria de la dispersión e introduciendo asimetrías: es decir, concentrando la energía en una dirección preferente.

La verdad es que son perfectamente viables armas nucleares que liberen, sobre un blanco, una energía por unidad de área mil veces superior, si no más, a la de un arma nuclear convencional. Fijando en el exterior de un dispositivo nuclear ciertos componentes o materiales especiales, se podría reconvertir la energía emitida por la detonación del arma; diseñando el explosivo nuclear y su revestimiento de forma idónea se podría también canalizar la mayor parte de la energía en la direccion deseada. Otra posibilidad alternativa: la energía liberada por un explosivo nuclear podría transformarse y dirigirse aprovechando los efectos que tal explosión provoca en su entorno natural. Con independencia de su destino inicial, si tales armas llegan a fabricarse, habrá que modificarlas para su aplicación a distintas misiones estratégicas y tácticas, ofensivas y defensivas, y en todo tipo de entornos.

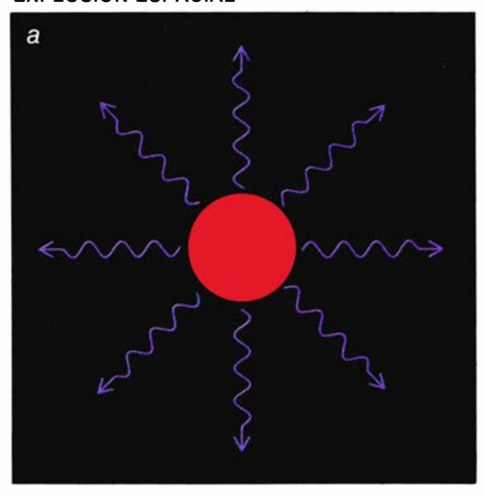
Como sus predecesoras, la nueva generación obtendrá su enorme energía explosiva de la fisión (rotura del núcleo por medio de un neutrón para originar dos nucleos de tamaño equiparable) o

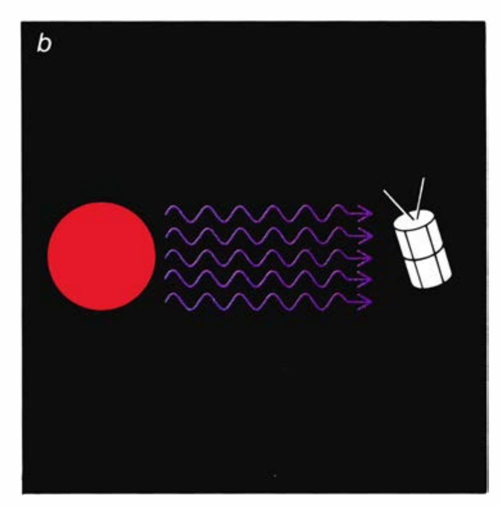


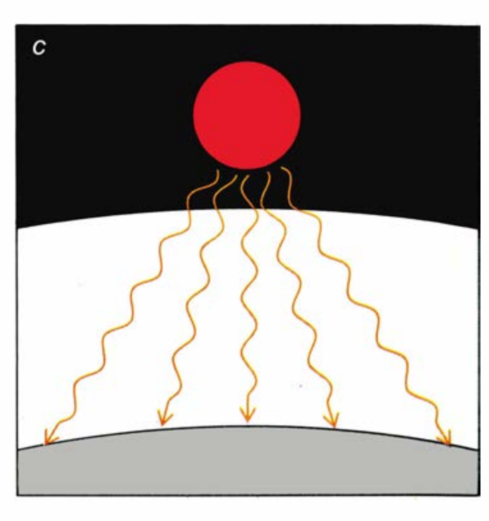
1. ESPECTRO DE EMISION de energía de las armas nucleares actuales. Ese patrón diferirá en la próxima generación de armamentos. Las cabezas nucleares que existen hoy en los arsenales (*arriba*) emiten su energía explosiva de muchas formas, cada una de las cuales se irradia uniformemente hacia fuera. Quiere ello decir que la región en cuyo dominio quedaría destruido o inutilizado el objetivo a abatir por los distintos tipos de energía (*código de colores*) se ajusta a una representación de círculos concéntricos. No ocurriría lo mismo con las cabezas nucleares de las armas del futuro: podrían ir equipadas con dispositivos que convirtieran y encauzaran la energía, permitiendo que una fracción significativa de la energía explosiva se transformara en microondas que se concentraran en el blanco (*abajo*).



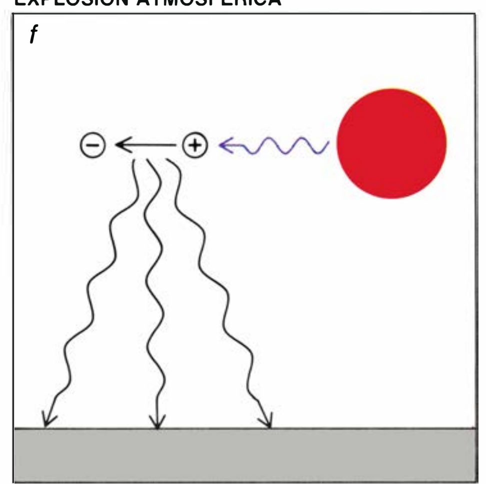
EXPLOSION ESPACIAL

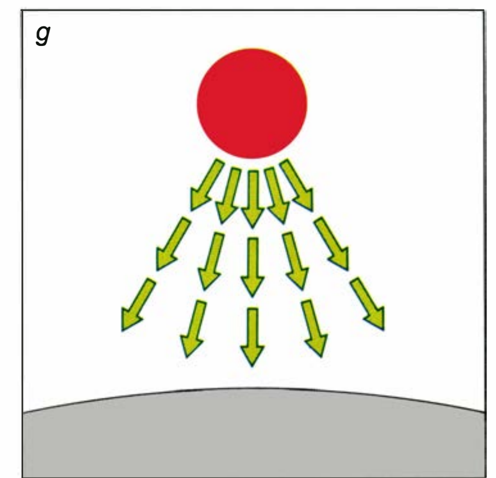


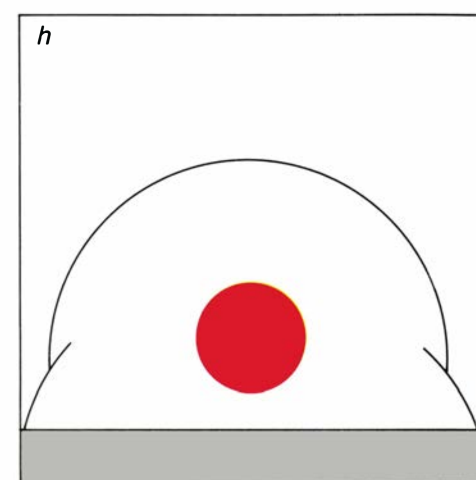




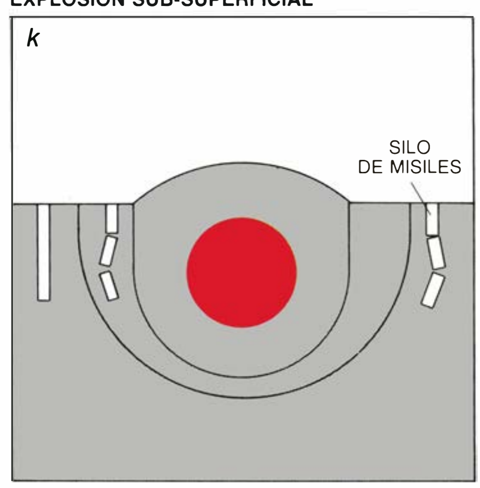
EXPLOSION ATMOSFERICA

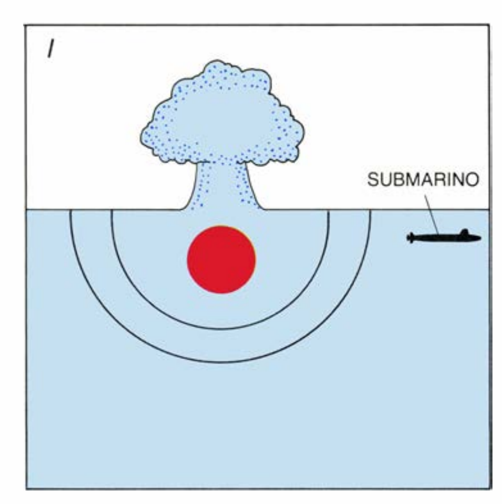


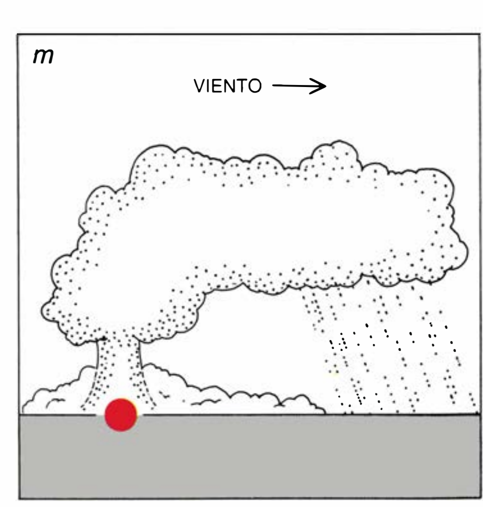




EXPLOSION SUB-SUPERFICIAL







RAYOS GAMMA

RAYOS X

LUZ VISIBLE
E INFRARROJA

MICROONDAS

ONDAS DE RADIO

NEUTRONES

ELECTRONES

ONDA DE CHOQUE

AIRE

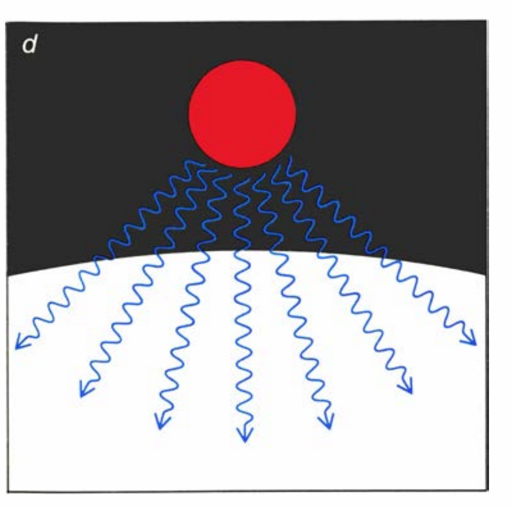
AGUA

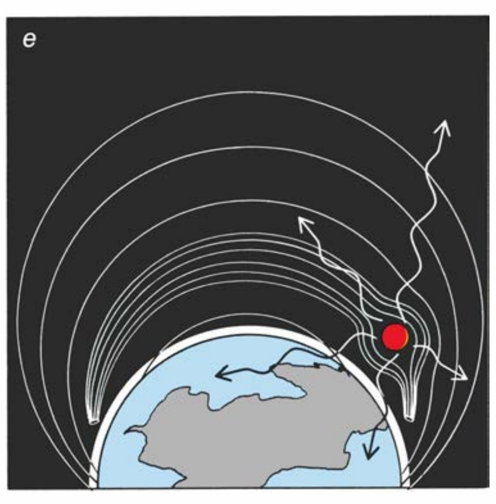
SUELO

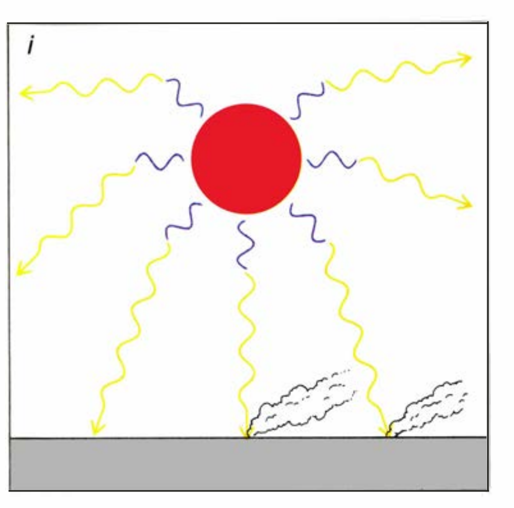
CAIDA

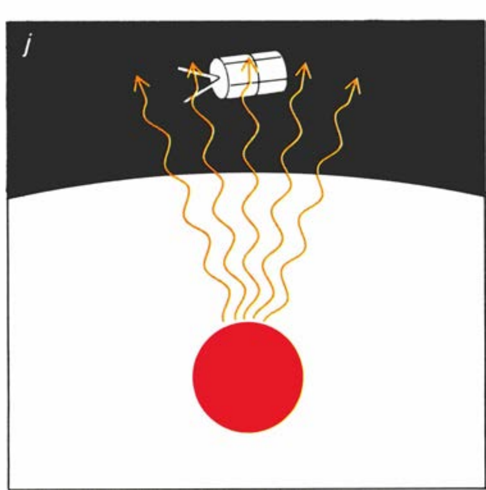
FRAGMENTOS DE ARMAS

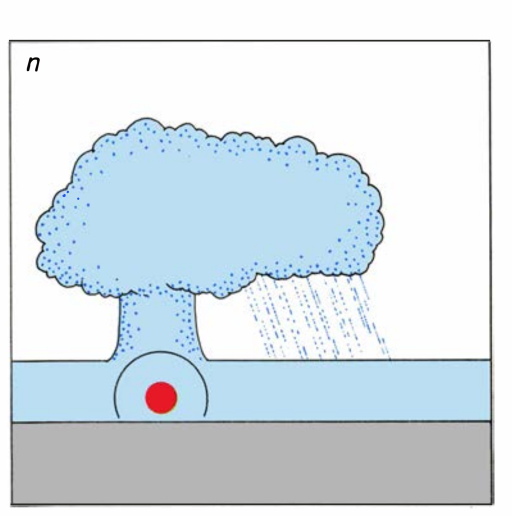
2. ENUMERACION DE LOS EFECTOS de interés militar que, según la lista de la izquierda, podrían lograrse con el desarrollo de la tercera generación de armas nucleares. Probablemente ese desarrollo suprimirá algunos efectos, aumentará otros y quizá canalice unos terceros en determinada dirección. En el espacio (*fila superior*), las armas nucleares podrían radiar rayos X incoherentes en todas las direcciones (*a*) o emitir radiación X coherente en una dirección privilegiada (*b*). Las microondas, que penetran fácilmente en la atmósfera, podrían llegar a la tierra desde el espacio, en particular si se fuerza la concentración de las mismas (*c*). Los rayos gamma

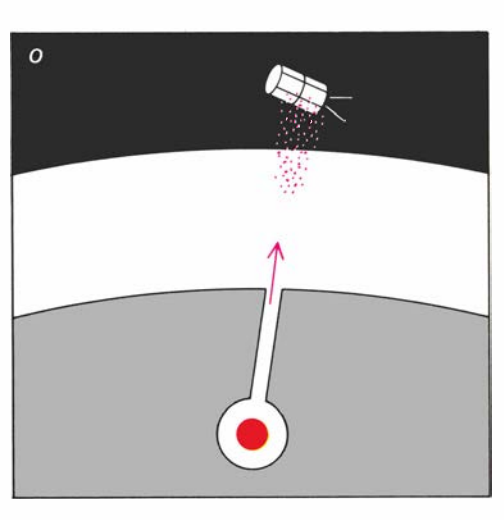












penetran también largo trecho en el aire y podrían encauzarse hacia objetivos desplegados en la atmósfera superior (*d*). Lo que quedara del arma tras la explosión nuclear por encima de la atmósfera, al estar ionizado, distorsionaría el campo magnético terrestre con la creación de un potente pulso de radiación electromagnética de gran longitud de onda (*e*). En la atmósfera pueden lograrse otros efectos similares (*fila central*): los rayos X inciden en los electrones sueltos de las moléculas de aire y generan una corriente eléctrica, brusca y enorme, que resulta en la emisión de un pulso de ondas de radio (*f*). Pueden intensificarse otros efectos que nos son más conocidos: emisión de neutrones (*g*), ondas de choque (*h*) e incendiarias (*i*). Los blancos desplegados en el espacio pueden abatirse mediante haces de microondas emitidos hacia el propio espacio (*j*). La energía de las explosiones subterráneas (*fila inferior*) puede interaccionar violentamente con el entorno inmediato para potenciar ondas de choque en el suelo (*k*) o en el agua (*l*). La cantidad y la distribución de la lluvia radiactiva desencadenada por las armas nucleares podría controlarse según los materiales elegidos como carcasa del arma y según el tipo de detonación subterránea (*m*) o submarina (*n*) provocado. La explosión subterránea podría lanzar proyectiles contra el espacio a través de una "tronera" o tubo de cañón (*o*).

de una combinación de la fisión y la fusión (unión de dos núcleos ligeros para formar otro más pesado). Las reacciones de fisión, de más fácil resolución, consisten, a grandes rasgos, en concentrar durante un microsegundo (una millonésima de segundo) suficiente material fisionable (uranio 235 o plutonio 239) en un volumen reducido donde se generen rápidamente una enorme cantidad de neutrones que induzcan la fisión. La reunión, a altísimas velocidades, de material fisionable se consigue mediante la detonación de cargas de explosivo químico; impulsándose así la convergencia de distintas partes del material para formar una sola masa compacta.

Menos sencillo resulta iniciar una reacción de fusión. Para ello se requieren temperaturas subidísimas (del orden de cientos de millones de grados Kelvin). De hecho, el único mecanismo práctico a través del cual se generan esas temperaturas en un dispositivo transportable es por acción de un explosivo de fisión. El desarrollo de un ingenio con un explosivo puro de fusión sin detonador de fisión se ha resistido al empeño de los expertos, quienes todavía andan en su búsqueda.

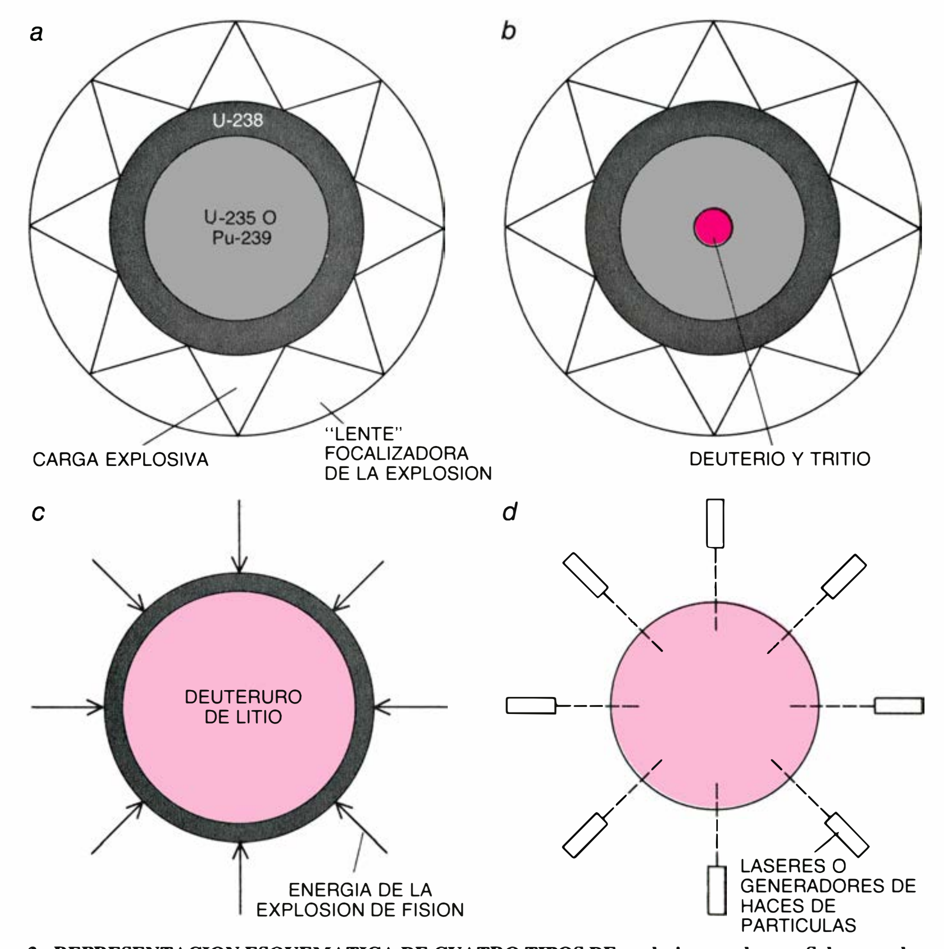
Las reacciones de fusión liberan bastante más energía por unidad de peso que las reacciones de fisión. Eso no es todo: producen también más neutrones de gran energía. Tales neutrones adicionales "sobrealimentan" el arma de fisión y aumentan su rendimiento si interaccionan con el uranio o con el plutonio de la misma. Por consiguiente, la introducción de pequeñas cantidades de combustible termonuclear (piénsese en el tritio o el deuterio, isótopos ambos del hidrógeno) en una arma de fisión incrementa su relación rendimiento-peso del arma, toda vez que el peso añadido para la ignición resulta insignificante.

A diferencia de las armas "sobrealimentadas", en las que la energía liberada en la fusión no contribuye de manera especial al rendimiento global del ingenio, las armas termonucleares obtienen una parte substancial de su energía explosiva de las reacciones de fusión. Las cantidades relativas de energía atribuibles a la fusión o a la fisión dependen del diseño particular de cada arma. Si mediante la energía liberada en una pequeña explosión de fisión detonante se comprime y calienta una considerable cantidad de deuteruro de litio (que, al irradiarla con neutrones, produce tritio), entonces la fracción del rendimiento total debido a la fusión puede ser muy grande en comparación

con la fracción atribuida a la fisión. Se dice que tales armas termonucleares son "limpias" porque liberan escasos productos de fisión radiactivos.

En el extremo opuesto se hallan las armas en las que el combustible termonuclear se encierra dentro de una cantidad substancial de uranio ordinario (uranio 238). Los neutrones de alta energía producidos por la fusión del combustible termonuclear inducen la fisión del uranio envolvente, multiplicando considerablemente el rendimiento total de la fisión.

Los índices de rendimiento-peso de las ojivas de fisión pura oscilan desde un límite inferior o igual a 0,0005 kilotones por kilogramo hasta un máximo de unos 0,1 kilotones por kilogramo. (Un kilotón equivale a la detonación de unas 1000 toneladas de TNT.) Se ha alcanzado una relación global rendimiento-peso de las cabezas termonucleares estratégicas cifrada en unos seis kilotones por kilogramo. Aunque las proporciones teóricas máximas sean de 17 y de 50 kilotones por kilogramo para las reacciones de fisión y de fusión, respectivamente, el cociente rendimiento-peso máximo en las armas norteamericanas ha obtenido ya, quizá, valores cercanos al límite práctico, habida cuenta de las pérdidas inevitables en el diseño de cualquier arma nuclear (debidas, sobre todo, a la imposibilidad de mantener el arma sin que se desintegre antes de producirse la fisión o la fusión completa del explosivo nuclear). Lo que no impide que el menor valor del cociente rendimiento-peso de un arma pura de fisión supere, en varios órdenes de magnitud, el de los explosivos químicos.

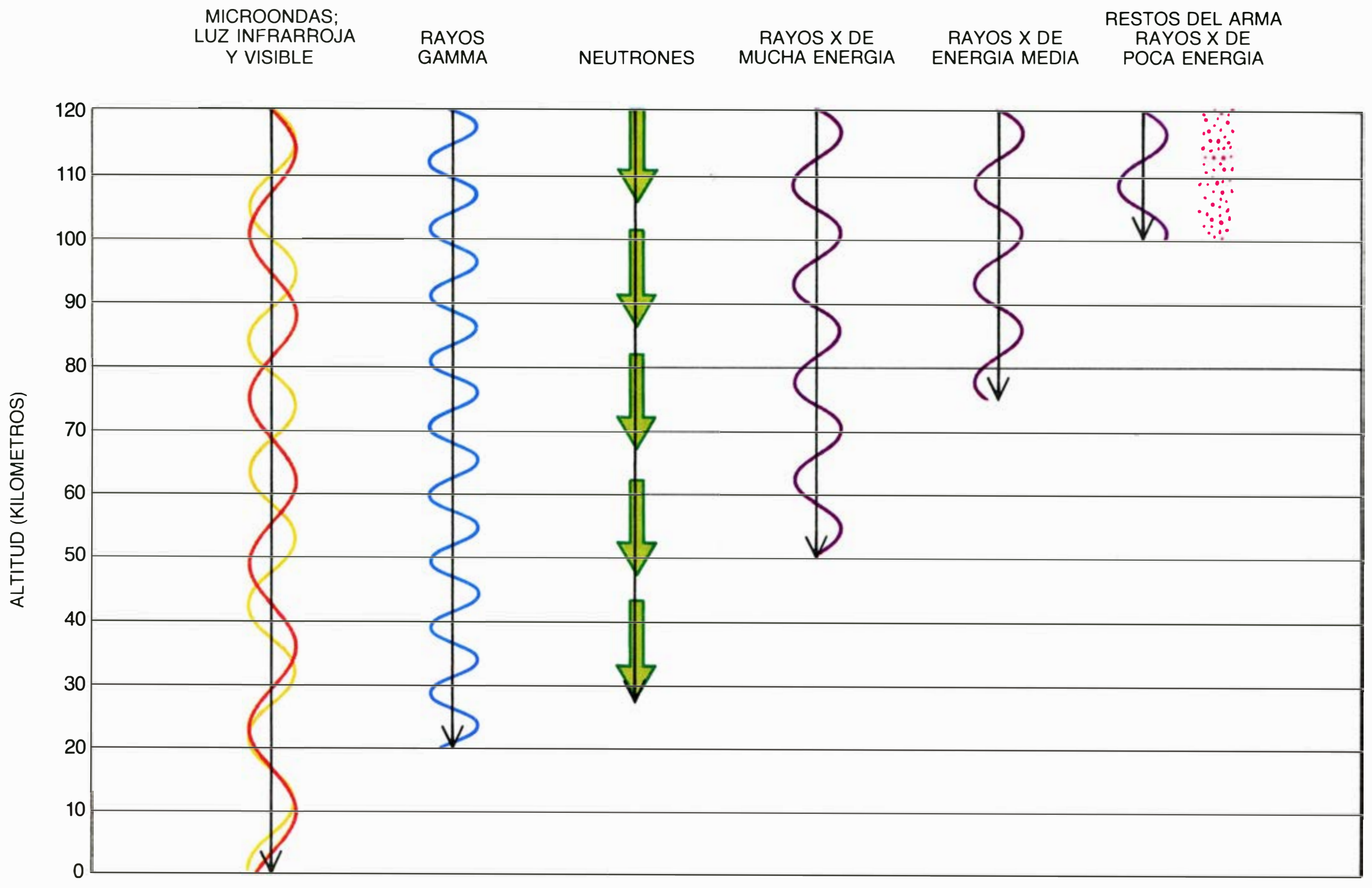


3. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE CUATRO TIPOS DE explosivos nucleares. Salvo uno, los demás se basan en el proceso de fisión (rotura de un núcleo en dos núcleos ligeros, provocada por el choque con un neutrón). El arma cuya energía explosiva se debe a la fisión (*a*) consta de un núcleo de material fisionable (uranio 235 o plutonio 239), rodeado de cargas de explosivo químico y estructuras inertes que dirigen la energía de la explosión de las cargas hacia el interior, iniciando la reacción en cadena del núcleo. El rendimiento de los explosivos de fisión aumenta extraordinariamente si se colocan junto a núcleos de deuterio y tritio (isótopos del hidrógeno). Las temperaturas producidas durante la detonación del explosivo de fisión inducen la fusión (unión de los núcleos) de los isótopos de hidrógeno, emitiendo grandes cantidades de neutrones, que a su vez desencadenan más reacciones de fisión. En este tipo de armas, la reacción de fusión no contribuye significativamente al rendimiento total del ingenio; pero representa la mayor parte del rendimiento de un arma, si se expone una cantidad substancial de combustible termonuclear, como el deuteruro de litio, a la energía liberada por la fisión (*c*). Una capa externa de uranio normal (uranio 238) sirve para mantener unida la ojiva durante una fracción de microsegundo después del estallido, permitiendo así que las reacciones nucleares produzcan más energía. Cuando se irradia con neutrones producidos por la fusión, el propio U-238 experimenta el proceso de fisión. Los ingenieros de armamento no han logrado, hasta la fecha, crear un arma pura de fusión (*d*), es decir, libre de la reacción de fisión, que se dispare mediante la aplicación de un láser, un haz de electrones o de iones que implosionen la reacción termonuclear.

La descarga de energía de un arma nuclear detonada es de una violencia y extensión sin par. Hasta el punto de que transforma en vapor e ioniza los propios materiales integrantes, convirtiéndolos en plasma: gas extremadamente caliente formado por iones de carga positiva y por electrones, de carga negativa. Además, los subproductos de las reacciones de fisión y de fusión emiten importantes cantidades de rayos gamma y neutrones. La energía cinética del plasma, al igual que las emanaciones nucleares, constituyen lo que podríamos denominar efectos primarios de la explosión nuclear: surgen de cualquier estallido nuclear, sin que importe el entorno en que éste ocurra.

El plasma predominante a las temperaturas inmediatamente subsiguientes a una explosión nuclear radia rayos X. En realidad, un 70 por ciento de la energía emitida en los primeros microsegundos después de la explosión forma este tipo de radiación. La fracción exacta de la energía explosiva total emitida a través de rayos X tiende a crecer según el valor de la razón rendimiento-peso, pues de ella depende la temperatura global del plasma generado con los residuos de la explosión nuclear. Cuanto mayor sea la cantidad de energía disipada en forma de rayos X, menor será la energía cinética del plasma. Si se trata de un plasma producido en un arma termonuclear con un cociente rendimiento-peso grande, alcanzará una velocidad típica de 1000 kilómetros por segundo; ello viene a suponer un 10 por ciento de la energía explosiva total.

Transcurrido ya una segundo desde la explosión, los rayos gamma emitidos ("rayos gamma inmediatos") dan cuenta del 3,5 por ciento de la energía total liberada por la fisión y de un 20 por ciento de la energía producida por algunos ciclos de las reacciones termonucleares. En los tipos habituales de explosivos nucleares casi todos estos rayos gamma se absorben en el interior del arma. La energía cinética de los neutrones engendrados durante los mismos instantes constituye otro 1,8 por ciento de la energía liberada por la fisión y, según el tipo de combustible termonuclear empleado, entre el 40 y el 80 por ciento de la energía liberada en la fusión. Los neutrones de gran energía tienden, sin embargo, a fre-



4. PENETRACION ATMOSFERICA de la energía emitida por una explosión nuclear en el espacio; la profundidad de la misma depende del tipo de energía. La radiación en la zona de las microndas, del visible o del infrarrojo del espectro electromagnético puede alcanzar la superficie terrestre sin excesiva atenuación.

narse mediante los choques inelásticos contra los elementos ligeros de los materiales de los sistemas de implosión. La energía promedio de los neutrones que escapan de la captura en los materiales del arma y llegan al entorno suele ser mucho menor. Este efecto reviste especial interés en las armas termonucleares, ya que el combustible está formado por elementos ligeros. En tales dispositivos, la energía de los neutrones se deposita deliberadamente en el combustible termonuclear, toda vez que los neutrones desempeñan una función crucial en la conservación de las elevadas temperaturas necesarias para conseguir grandes velocidades de reacción.

A lo largo de los últimos cuarenta años, la investigación nuclear no se ha preocupado de la potenciación ni la supresion de determinadas formas de energía, si dejamos aparte el ajuste de las cantidades relativas de fisión y de fusión que ocurren en la ojiva nuclear. La bomba de neutrones constituye la excepción de la regla [véase "Armas de radiación intensiva", Fred M. Kaplan; Investigación y Ciencia, julio de 1978]. La bomba de neutrones es un explosivo termonuclear de bajo rendimiento diseñado para producir una emisión reforzada de neutrones de alta energía por cada kilotón. Se pretende que sea una arma nuclear contrapersonal, desencadene una explosión mínima y origine la menor contaminación radiactiva posible.

Así como puede diseñarse un arma nuclear que refuerce su emisión de neutrones primarios a expensas de su poder explosivo y de su emisión radiactiva, cualquier otra energía primaria liberada por un explosivo atómico podría ser susceptible de privilegio distribuyendo materiales apropiados en geometrías adecuadas y próximos al explosivo. Se conseguiría un control importante sobre la cantidad de energía de la radiación X, si cambiáramos, por ejemplo, el peso molecular promedio de los materiales del arma, el área de la superficie exterior y la forma en que la energía generada en su núcleo se distribuye por el frente de expansión de los residuos después de la detonación.

Los cambios en el diseño de las armas termonucleares podrían también incrementar substancialmente la energía de los rayos gamma inmediatos. Una medida sería cubrir el arma con un isótopo que, al ser bombardeado con neutrones, emita rayos gamma. De este modo, los neutrones adicionales que provienen de la fisión o de la fusión y se escapan del núcleo del arma inducirían la emisión de rayos gamma, la mitad de los cuales dejaría, probablemente, los residuos de la explosión. (La otra mitad se radiaría hacia dentro y la absorbería la materia residual.)

De entre los restos del arma podrían controlarse, en una gama amplia, los productos de fisión radiactivos (los principales componentes de la emisión), especialmente en el caso de armas termonucleares que presentan rendimientos superiores a cientos de kilotones. Además, se elevaría la letalidad de la emisión radiactiva cubriendo las armas con isótopos que, al ser irradiados con neutrones, produzcan núcleos radiactivos de semividas y formas de desintegración escogidos.

Los efectos de una explosión nuclear también podrían encarrilarse en una dirección determinada, a imagen de lo que ocurre con las cargas huecas convencionales y otros proyectiles altamente explosivos, que producen chorros de metal fundido o granada de metralla direccional que atraviesan el blindaje. Fijándose en cómo las cargas explosivas de forma no esférica liberan su

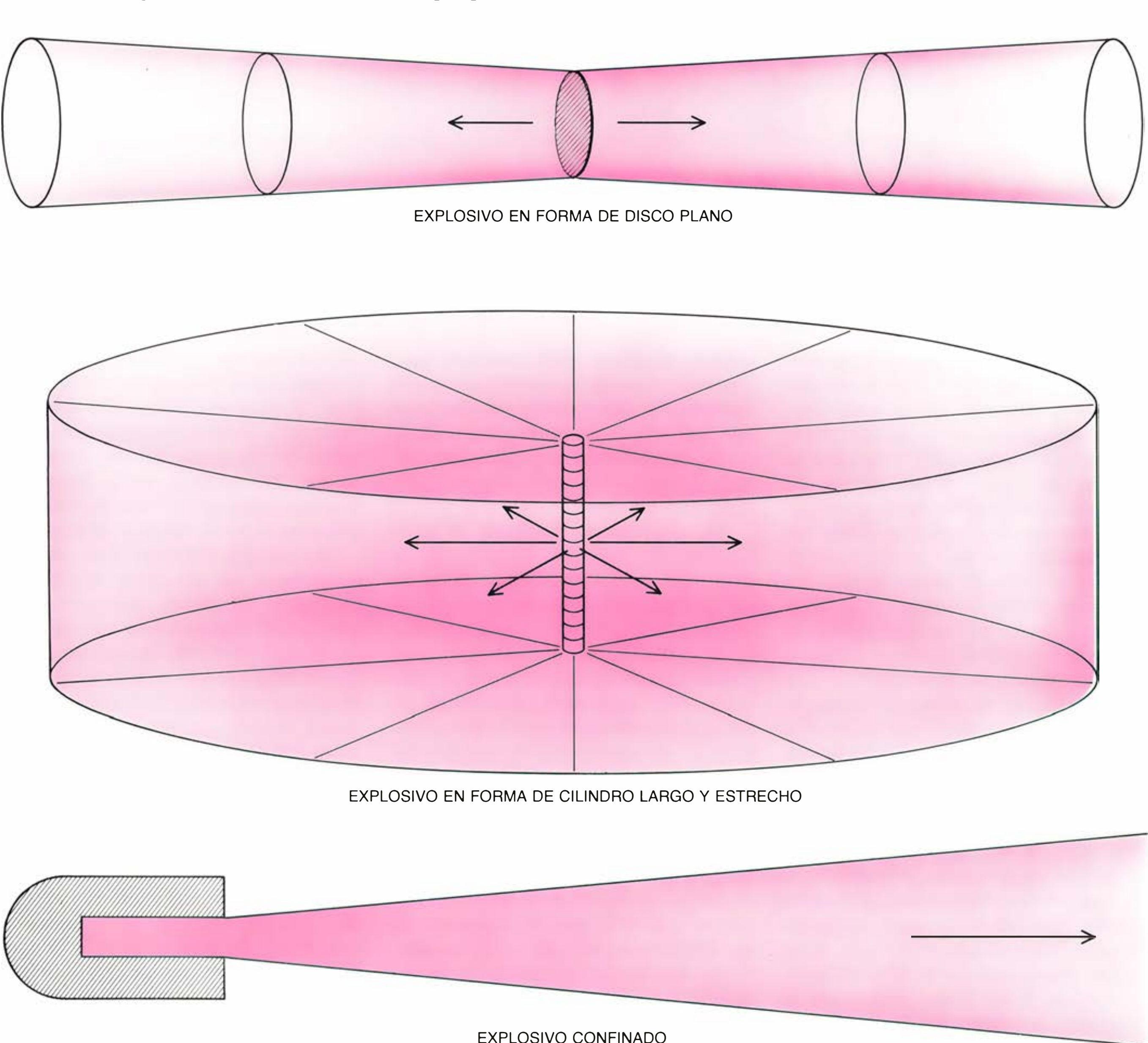
energía, se pueden sacar ideas para el propio diseño [*véase la figura 5*].

Pongamos un ejemplo. En la detonación de un disco entero de alto explosivo se desencadena una dispersión de los productos de la explosión en un doble cono característico, por la sencilla razón de que la velocidad de los productos de la explosión en una dirección perpendicular a las dos superficies del disco es mayor que su velocidad radial. El ángulo del vértice de los conos está determinado por la relación entre el espesor del disco y su diámetro. El promedio del flujo total de energía cinética (energía por unidad de área y por unidad de tiempo) de los productos de la explosión que cruzan un plano perpendicular al eje del doble cono sería, sin embargo, considerablemente mayor que si la misma masa de explosivo expeliera sus productos en configuración esférica. Si la velocidad promedio de los productos de la explosión en la dirección del eje del cono es 40 veces su velocidad radial promedio (correspondiente a un ángulo del cono de unos tres grados), el aumento sería de un factor 3000, aproximadamente.

De segundo ejemplo nos sirve la detonación de un cilindro largo y delgado de alto explosivo. En este caso, las velocidades mayores se alcanzan en las direcciones perpendiculares a los ejes del cilindro. Por consiguiente, los productos de la explosión tienden a conservar el modelo cilíndrico; aquí el factor de aumento en el flujo de energía tiende a ser menor que el factor del ejemplo precedente.

El último ejemplo que daremos es el de una carga de alto explosivo que se comprime o confina, mediante un material denso, en todas las direcciones salvo en una. En tal caso, los productos de la explosión se proyectan en esa dirección privilegiada. El peso adicional que acarrea la masa inerte alrededor del explosivo se compensa con la concentración de energía en la abertura. Esta es la razón por la que una bala de rifle puede producir un efecto mucho mayor contra un blanco que la detonación de una masa de un potente explosivo que pese lo mismo que el rifle.

Ni que decir tiene que las reacciones nucleares liberan más formas de energía a intensidades mucho mayores que los potentes explosivos químicos, incluidos rayos gamma, rayos X, neutro-



5. CARGAS QUIMICAS: expulsan los productos de la explosión (principalmente ondas de choque y restos de los materiales del arma) en una configuración muy alejada de la esfericidad. El disco plano de explosivo químico emite sus productos en un doble cono característico. La explosión de un cilindro largo y delgado genera una dispersión de forma cilíndrica. Finalmente, restringiendo o amortiguando los efectos de la explosión con un material denso e inerte en todas las direcciones, menos en una, los productos de la explosión se concentran en ésta. Los explosivos nucleares podrían aplicar esos efectos direccionales.

nes y un amplio abanico de núcleos radiactivos. Y está claro también que los explosivos nucleares, aunque sean de muy bajo rendimiento, ofrecen muchas más oportunidades que los explosivos químicos para la producción de efectos direccionales.

La mayor parte de los efectos letales de una explosión nuclear son efectos secundarios, resultantes de la interacción entre la energía cinética del plasma de los restos del arma y la radiación inicial (rayos X), por un lado, y el medio en el que se produce la detonación, por otro. Así pues, muchos de los efectos de interés militar que se producen en una explosión nuclear están determinados por propiedades del medio: presión, densidad y composición. Son las variaciones de estas propiedades las que dan cuenta de la amplia divergencia en las respuestas asociadas a las explosiones nucleares en el espacio, en la atmósfera, en el suelo y en el subsuelo. Seleccionando los efectos primarios e intensificándolos o suprimiéndolos, los efectos secundarios del arma pueden transmitirse hacia sus objetivos con mayor eficacia según sean las condiciones ambientales reinantes.

Al hallarse el espacio virtualmente vacío, no hay medio con qué interaccionar; quiere ello decir que los productos primarios de una explosión nuclear (rayos X, plasma de los restos del arma y radiación nuclear) viajarán en la misma dirección en que se han emitido hasta que choquen contra algo o hasta que el campo magnético o el gravitatorio de la Tierra los desvíen (de acuerdo con su carga eléctrica o su masa). Por esa razón, las asimetrías iniciales en la distribución de masa de un explosivo en el espacio tienden a conservarse, a lo largo de dilatadas distancias, en la forma de la energía radiada.

La detonación de un explosivo nuclear por encima de la atmósfera, aunque dentro del campo magnético terrestre, determina que la expansión del plasma en direcciones más o menos perpendiculares a las líneas del campo magnético distorsione el propio campo. Cuando esto ocurre, una fracción importante de la energía cinética de los restos del arma se convierte en energía electromagnética, lo que provoca la emisión de una ráfaga brusca de radiación con una amplia gama de longitudes de onda, desde pocos metros hasta cientos de kilómetros o incluso mayores. Tal pulso electromagnético (PEM) puede suponer una parte substancial de la energía total de la explosión, capaz de propagarse, apenas amortiguada, a través de la atmósfera hasta la superficie terrestre.

Las explosiones nucleares provocadas en el espacio o en regiones muy altas de la atmósfera pueden producir otro tipo de pulsos electromagnéticos. En este caso, los rayos gamma o rayos X de gran energía inciden en la zona superior de la atmósfera y expulsan los electrones de las moléculas de aire. Tal cascada repentina de electrones equivale a una enorme ola de corriente eléctrica. Como la corriente no sería esféricamente simétrica (fluiría predominantemente hacia donde hubiera mayores densidades de aire, es decir, hacia abajo) y variaría con el tiempo, generaría campos magnéticos transitorios que producirían, a la vez, radiación electromagnética en pulsos electromagnéticos.

En virtud del incremento, casi exponencial, de la densidad atmosférica con el descenso de la altitud, parte importante de la energía radiada hacia abajo por una explosión nuclear allende la atmósfera queda depositada en las zonas superiores de la propia atmósfera. El descenso de esta energía puede producir a veces graves efectos secundarios que se propagan hacia la superficie terrestre. Los rayos X y los restos del arma dotados de intensidades elevadas (energía total por unidad de área) pueden calentar la atmósfera hasta la temperatura en que ésta despida luz visible y radiación infrarroja. Los rayos gamma, los neutrones y los rayos X emitidos por el arma, lo mismo que los productos finales de los radionúclidos, pueden generar, directa o indirectamente, corrientes eléctricas en la capa de la atmósfera donde depositen su energía. Estas corrientes crean entonces otros pulsos electromagnéticos, cuyas longitudes de onda y niveles de potencia instantáneos abarcan una amplia gama de valores. El calentamiento de la atmósfera desencadena complejas reacciones químicas que afectan a la transmisión y reflexión de las ondas de radio.

En la baja atmósfera, en zonas subterráneas o en los lechos de los cursos y reservorios de agua, la radiación X primaria producida en la explosión de un arma nuclear es absorbida por los átomos y moléculas del medio, a pocos metros del punto de detonación. Significa ello que el medio se calienta rápidamente, formando una bola de fuego, que reemite radiación electromagnética de frecuencias menores. La mayor parte de esta radiación pertenece a la región del visible y a la del infrarrojo del espectro y llega bastante lejos a través del aire.

La energía radiativa se combina también con la energía cinética del plasma expansivo para producir un impulso de presión, de una fuerza enorme, sobre el entorno circundante. Cuanto más denso es el medio, mayor es la cantidad de energía transformada en onda de choque. Por tanto, en las explosiones provocadas en el agua o en la tierra se convierte en onda de choque un mayor porcentaje de la energía que en el caso de una explosión en el aire.

Las explosiones producidas en la superficie, subterráneas o a pequeña altura despedirían hacia el aire enormes cantidades de polvo, restos del cráter abierto, estructuras afectadas o masa de agua, que adquirirían de una forma directa o indirecta una potentísima fuerza devastadora. Habría que añadir que buena parte de este material sería, quizá, radiactivo y contaminaría, al depositarse, extensas zonas.

Durante la ingente emisión energética producida en una explosión nuclear, se generan, asimismo, otras formas de energía que no suelen constituir los conocidos efectos primarios o secundarios. Además, se trata de energías que pueden canalizarse en pequeños ángulos de emisión. El punto fundamental de tales armas (cuya exposición pormenorizada es, obviamente, materia reservada) consiste en cómo convertir una fracción substancial de la energía de una explosión nuclear en una energía determinada que pueda emitirse en la dirección deseada. Baste decir que la energía electromagnética con longitudes de onda típicas de los rayos gamma, rayos X, luz visible y microondas puede focalizarse de una manera parecida al procedimiento seguido con los láseres: dispositivos que instan la radiación en fase de átomos y las moléculas de un material. La emisión dirigida de la radiación de mayor longitud de onda requiere que las armas estén equipadas con una suerte de antena. Se trata siempre de cómo encauzar el flujo torrencial de energía de una explosión nuclear hacia un dispositivo de conversión y direccionamiento de esa energía microsegundos antes de que el propio dispositivo se desintegre. Otra opción, que podría simplificar el problema, sería instalar los dispositivos nucleares en una estructura reutilizable de la que se pudiera extraer la energía explosiva. Tales estructuras, diseñadas para soportar explosiones de hasta un kilotón, han sido objeto de estudio du-

rante varias décadas. El laboratorio estadounidense Lawrence Livermore acaba de abordar un proyecto de construcción de una cámara de este estilo, donde se puedan estudiar un amplio espectro de efectos nucleares.

En armas con base terrestre destinadas al ataque de objetivos espaciales, el peso del equipamiento necesario no importa tanto como en el caso de las armas desplegadas en el espacio. Cabe esperar, pues, que los progresos técnicos que se registren en el desarrollo de armas nucleares direccionales e instaladas en arsenales terrestres diferirán de los exigidos por armas similares que se hallen en el espacio. Sobre las armas espaciales, las alojadas en silos presentan las siguientes ventajas: no entran en los tratados de armas nucleares en el espacio, son susceptibles de adaptarse a grandes y pesados equipos de conversión (con su correspondiente gran direccionabilidad y conversión más eficaz de la energía de la explosión en la forma radiada), cuestan muchísimo menos y permiten la reutilización del equipo.

La conversión de la energía de la explosión en pulsos de energía eléctrica, más domeñables, se realiza en los generadores magnetohidrodinámicos: dispositivos que transforman la energía cinética del plasma en electricidad. (Se ha hablado de usar estos convertidores de electricidad en los reactores de las plantas de fusión.) Los pulsos de energía eléctrica alimentarían entonces los convertidores de electricidad en radiación electromagnética (con o sin la autodestrucción del dispositivo), y ésta podría focalizarse con precisión hacia blancos en el espacio. En la mayoría de los casos, el menguado rendimiento de tales convertidores energéticos se compensa con creces merced al grado de enfoque, muy alto, en la dirección del blanco.

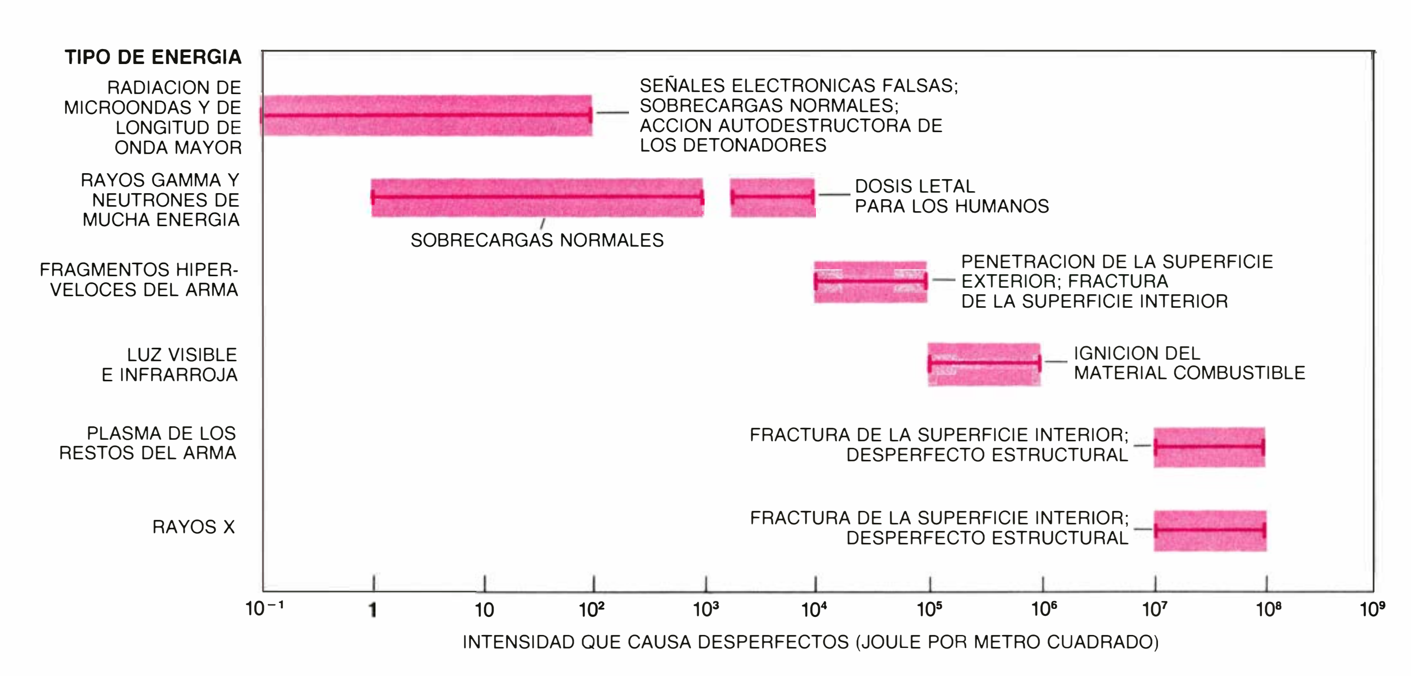
Una posibilidad más radical sería el aprovechamiento de una explosión nuclear subterránea, de escasa potencia, para acelerar grandes proyectiles a través de lo que vendría a ser el equivalente a un tubo de cañón. Proyectiles hipercéleres que alcanzarían velocidades próximas a la velocidad de escape de la Tierra (cifrada en unos 10 kilómetros por segundo). Fabricados con un diseño idóneo, esos proyectiles compactos penetrarían en la atmósfera cual si se tratara de grandes meteoritos. Durante la década de los cincuenta se abordó esta posibilidad para colocar cargas en el espacio con un coste relativamente bajo.

Piénsese, por ejemplo, que la energía cinética de 10 toneladas de un material que corre a 10 kilómetros por segundo equivale a 100 toneladas de TNT. En ese orden, el uso eficaz de una explosión nuclear con un rendimiento aproximado de un kilotón proporcionaría una energía propulsiva más que suficiente. Con un "tubo de cañón" de unos cuantos centenares de metros, la aceleración promedio del proyectil multiplicaría por 10.000 la aceleración de la gravedad de la Tierra, sin superar el esfuerzo mecánico máximo que pueda soportar un proyectil de gran densidad. La posterior fragmentación de esos ingenios en astillas sólidas o en gotas líquidas los convertirían en armas muy eficaces contra satélites y ojivas nucleares de misiles balísticos que hubiera en el espacio.

Pasemos a otra alternativa: diseñar armas nucleares cuya detonación acelere, por sí misma y directamente, material del arma que, a continuación, se fragmente en bolitas o gotas que alcancen velocidades muy por encima de los 10 kilómetros por segundo. Esas armas enfocarían fácilmente los fragmentos hipercéleres en un volumen cónico, aunque tendrían que ir dotadas de un mecanismo que controlara el proceso de aceleración para evitar la vaporización de los fragmentos. Se limitarían, probablemente, al ataque contra objetivos desplegados en el espacio o en las capas superiores de la atmósfera, pues a bajas alturas las astillas no llegan tan lejos como los efectos destructores de las ondas explosivas.

Para determinar los daños que puede sufrir un objeto expuesto a las distintas formas de energía que libera una explosión nuclear, se atiende al tipo de energía que, con mayor probabilidad, alcanzará al objeto, la clase de impacto y, en muchos casos, la tasa de deposición de dicha energía. Este capítulo de los efectos de las explosiones nucleares, de extremada complejidad, no suele conocerse bien.

El abanico de intensidades totales de energía que pueden causar la inutilización temporal o la pérdida definitiva



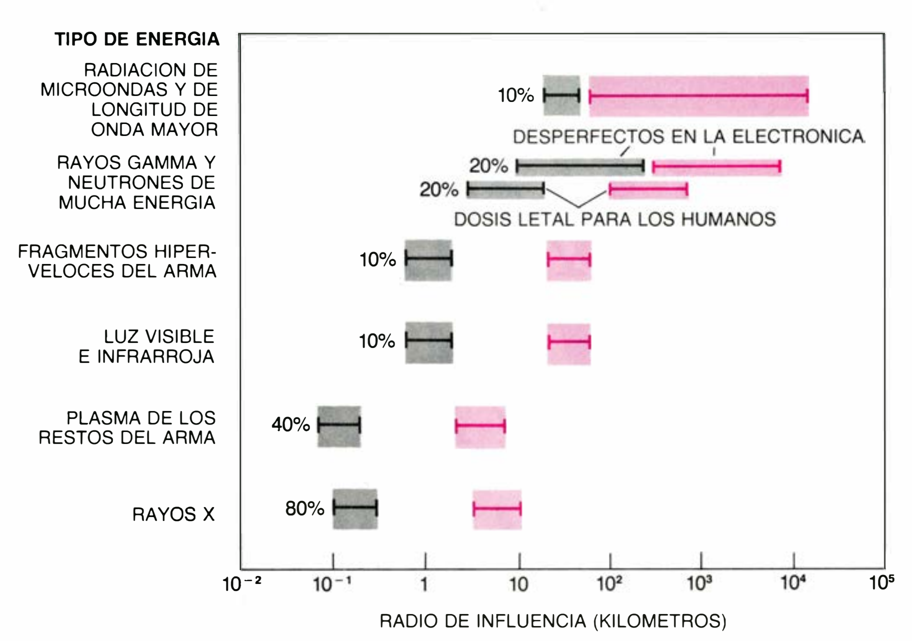
6. CAPACIDAD DESTRUCTORA de los diferentes tipos de energía e intensidad (energía total por unidad de área) necesaria para producir esos efectos en objetivos militares. Bastan pequeñas intensidades de radiación de microondas o de radiación de longitud de onda mayor para infligir los daños reseñados. Ahí radica la causa de que las armas nucleares de la tercera generación pudieran insistir en esos tipos distintos de radiaciones y en su reforzamiento.

de blancos militares o civiles varía en torno a nueve ordenes de magnitud [*véase la figura 6*]. Los efectos de la radiación de longitud de onda más larga (así, la producida por un pulso electromagnético) en el extremo inferior de las escala de intensidades de energía son también los más sutiles y difíciles de evaluar; son, además, los que comportan mayor incertidumbre.

Una intensidad de 0,1 joule por metro cuadrado multiplica un millón de veces cualquier radioseñal detectable de un segundo emitida por un radiotransmisor simétricamente esférico de 10 kilowatt a 100 kilómetros. Se sabe de comunicaciones militares y comerciales y transmisiones de radar, productoras de menores intensidades, que han causado igniciones de detonadores de grandes explosivos y han entorpecido el funcionamiento de computadores y otros equipos eléctricos y electrónicos. Se trataría de efectos similares a los producidos por los pulsos electromagnéticos de las explosiones nucleares. No es ningún secreto que los efectos de la radiación electromagnética en los equipos militares han instado las medidas de protección contra ella. Algunas comportan la presencia de escudos conductores y la supresión de componentes que sean sensibles, incluso a los pequeños pulsos de corriente producidos por la radiación electromagnética que los pudiese penetrar. Pero tales medidas no han resultado siempre satisfactorias.

Los transistores y otros componentes de los sistemas electrónicos se muestran muy sensibles a pequeñas corrientes y a otros efectos dimanantes del bombardeo de rayos gamma y de neutrones. Con una adecuada protección, o simplemente restringiendo el uso de esos componentes, se consigue reducir al mínimo su amenaza. Sin embargo, la falta de medidas de protección de los sistemas civiles o comerciales desplegados en el espacio los hace también extremadamente vulnerables a la radiación nuclear de esa índole.

Los rayos gamma, los neutrones, los rayos X de alta energía y los radionúclidos que inciden sobre blancos espaciales ionizan de tal suerte a éstos que su potencial eléctrico llega a alcanzar valores del orden de la energía máxima de las partículas emitidas. Es posible que el campo eléctrico cerca de la superficie llegue al millón de volt por metro, suficiente para inutilizar transitoria o definitivamente los dispositivos eléctricos internos que carezcan de la protección necesaria.



7. MAXIMA DISTANCIA desde el punto de detonación en que son susceptibles de ser abatidos o dañados los objetivos militares desplegados en el espacio. Varía con el tipo de energía utilizado y la fracción de la energía explosiva total que representa. Se consideran dos casos: un arma de un kilotón (*negro*) y otra de un megatón (*rojo*). (Un kilotón es la energía equivalente a la detonación de 1000 toneladas de TNT; el megatón equivale a 1000 kilotones.) Las barras indican la relación estimada de daño-radio para las armas de la tercera generación, cuyas energías se hayan visto acrecentadas aunque no dirigidas. El porcentaje de la energía explosiva total concentrada en cada tipo de energía se señala junto a cada par de barras. Se conseguiría un radio de influencia mucho mayor si se focalizara la energía del arma. (Esquemas de Hank Iken.)

A diferencia de los neutrones o rayos gamma, los fragmentos hipercéleres perforarían la superficie del blanco. La vertiginosa eyección de material durante la formación del agujero produce una intensa onda de choque en el objetivo. Con una velocidad 100 veces la de la bala de un rifle, los fragmentos hipercéleres, cuya masa no llega ni de lejos al gramo, atacan con contundencia los objetivos del espacio.

La luz visible y la radiación infrarroja emitidas como efecto secundario, debido al calentamiento de la atmosfera, pueden, en principio, incendiar los materiales combustibles de la superficie del blanco. Y si ésta es incombustible, el calentamiento no uniforme de la misma atentará contra su integridad en virtud de los esfuerzos térmicos resultantes.

La radiación X de alta energía y el plasma procedente de los restos del arma hacen mella en el blanco espacial al provocar el rápido escape de vapor del material de la superficie del objetivo. Si se trata de rayos X, el cambio brusco de temperatura se transmite a través de las capas exteriores del objeto, destrozando las zonas interiores, en la hipótesis de que el tiempo necesario para que se absorba la energía incidente sea menor, en comparación, que el invertido por la onda térmica en alcanzar la superficie interior. Tal proceso recibe el nombre de "astillamiento". Pero si hablamos del plasma incidente, no se produce ese efecto; tarda mucho en la deposición de su energía cinética en el blanco. En cualquier caso, el momento global transferido, de la gasificación de la superficie al interior, asesta un golpe irreparable a pesar de que no se produzca el astillado.

Para hacernos una idea más cabal de todos estos cálculos, fijémonos en la gama de valores en que se mueve un portador de energía al producirse el impacto [*véase la figura 7*]. Los mayores niveles de daño potencial (o, lo que es lo mismo, grandes intensidades para una distancia dada) se consiguen emitiendo la energía dentro de un ángulo estrecho. La radiación de microondas, con longitudes de onda comprendidas entre los tres centímetros y un metro, resulta apropiada para la emisión direccional, pues la atmósfera es casi transparente para este rango de longitudes de onda, lo que permite usarla desde la tierra hacia el espacio, al revés y desde el espacio hacia el espacio. Además, los niveles de intensidad de microondas necesarios para destruir ciertos objetivos militares y civiles son los menores de entre todas las formas de radiación electromagnética.

Dedúcese de ello el imponente potencial militar de los haces de microondas dirigidos. Supongamos, por ejemplo, que pudiéramos convertir el 5 por ciento de la energía liberada por una explosión de un kilotón en radiación de tres centímetros, emitida mediante una antena de 50 metros de diámetro o por un láser de microondas equivalente. La explosión de tal dispositivo en una órbita geosíncrona a 30.000 kilómetros depositaría una energía de 800 joule por cada metro cuadrado sobre un área de 250 kilómetros cuadrados de superficie terrestre. Esta intensidad rebasa el nivel que se sabe es el causante de importantes daños a componentes eléctricos, computadores, antenas, relés y líneas de conducción eléctrica. Ni que decir tiene que a distancias menores la intensidad sería mayor; a 400 kilómetros, por ejemplo, resultaría de cinco millones de joule por metro cuadrado.

El desarrollo y despliegue de tales armas de microondas complicarían extraordinariamente la táctica y la estrategia militar, ofensiva y defensiva. Dejaría fuera de servicio, temporal o definitivamente, los equipos eléctricos y electrónicos habituales en los sistemas de vigilancia militar, de rastreo, de comunicaciones, de navegación y de otras funciones de mando y control. En razón de la transparencia atmosférica a la radiación de microondas, los dispositivos generadores de haces de éstas y los propios blancos pueden estar en el espacio, en la atmósfera o en la superficie de la tierra. En cualquier circunstancia, el despliegue de esos ingenios bélicos socavaría, a buen seguro, la confianza en el recto funcionamiento de las fuerzas estratégicas y tácticas, incluidas las que constituyen el último eslabón de la disuasión nuclear.

¿Cuál es la probabilidad real de creación y despliegue de esta tercera generación de armas nucleares? La respuesta tiene que ver con la naturaleza y cuantía de la ayuda que los EE.UU. y la URSS aporten a sus respectivos laboratorios militares. El progreso de un campo en un bloque desencadena, inevitablemente, la voluntad de emulación en el otro. Los indicios de los pasos dados por el adversario en un camino determinado marcarán la pauta de actividad para el otro.

Un signo claro del empeño de un país se revela en la frecuencia de las pruebas. Si los EE.UU prosiguen en los ensayos subterráneos y la URSS los reanuda, aunque sean con niveles por debajo del límite de 150 kilotones impuesto por el Tratado de Limitación de Pruebas Nucleares, el desarrollo de los nuevos tipos de armas nucleares ofensivas y defensivas será sólo cuestión de tiempo.

Respuesta de los fotorreceptores a la luz

Nuevos datos acerca de la transformación de la energía luminosa en impulsos nerviosos señalan que las células fotorreceptoras registran la absorción de hasta un solo fotón

Julie L. Schnapf y Denis A. Baylor

La visión se inicia con la transformación de los paquetes de energía electromagnética denominados fotones, o cuantos, en señales nerviosas susceptibles de análisis por parte del cerebro, tarea que está encomendada a las células fotorreceptoras del ojo. Se encuentran éstas dispuestas en forma de mosaico en la superficie posterior de la retina, la capa de neuronas que reviste el interior del globo ocular. La córnea y el cristalino oculares configuran una imagen del mundo exterior sobre la lámina de fotorreceptores. Cada célula absorbe la luz de un punto de la imagen y genera una señal eléctrica en la que se codifica cuánta luz ha absorbido. Una elaborada red de sinapsis, o conexiones neuronales, transmite las señales a través de la retina y el cerebro. En esas conexiones se reúnen y comparan las señales procedentes de la población de fotorreceptores, proceso que permite que el sistema visual obtenga información sobre la forma, el movimiento y el color del mundo exterior.

Siendo de tanta importancia el papel que desempeñan los fotorreceptores en el proceso de la visión, resulta sorprendente que durante mucho tiempo se conocieran relativamente mal sus mecanismos de actuación. Desde el último cuarto de siglo, esa situación ha cambiado radicalmente. Los avanzados métodos de obtención de registros eléctricos han facilitado información detallada sobre el mecanismo mediante el cual la energía luminosa se transforma en impulsos nerviosos. Las nuevas técnicas han posibilitado la observación directa de la señal emitida por la absorción de un fotón. Asimismo, tales mediciones han facilitado la elaboración de explicaciones sencillas de varias características del comportamiento general del sistema visual: por qué percibimos los estímulos oscuros más lentamente que los luminosos; por qué en ocasiones, encontrándonos en completa oscuridad, vemos luz o por qué ciertas combinaciones de distintas longitudes de onda instan la misma sensación de color que la luz de una sola longitud de onda.

Los ojos de la mayoría de los vertebrados poseen dos tipos de fotoreceptores: bastones y conos. Los bastones intervienen en la visión con luz escasa, siendo tan sensibles que se sobrecargan y pierden la capacidad de emitir señales en el nivel lumínico ordinario del pleno día. Los conos intervienen en la visión a plena luz; operan adecuadamente con niveles lumínicos elevados. La visión que corre a cargo de los conos es más rica en detalles espaciales y temporales y permite la percepción del color.

Los bastones y los conos disponen de orgánulos especializados en el transporte y transmisión de señales. En un extremo de la célula (el más alejado del cristalino) se encuentra el denominado segmento externo, que absorbe la luz y genera las señales eléctricas. En el otro extremo se localiza la terminación sináptica que, mediante la secreción de un transmisor químico, envía las señales a otras neuronas (las células bipolares y horizontales) de la retina. Entre el segmento externo y la terminación sináptica se extiende una región denominada segmento interno.

El segmento externo de los bastones es cilíndrico, mientras que el de los conos suele ser afilado, de ahí sus respectivas denominaciones. Ambos tipos de segmento externo contienen una gran extensión de membrana fotosensible, tachonada de moléculas de un pigmento que absorbe la luz. Los bastones poseen rodopsina, un pigmento rojizo. En la retina humana existen tres tipos de conos, cada uno de los cuales contiene un pigmento que absorbe con máxima intensidad en las regiones de corta, media y larga longitud de onda del espectro visible. Las diferencias en las bandas de absorción de los tres pigmentos de los conos constituyen la base de la visión del color. A la luz de la noche, cuando la visión corre a cargo de los bastones, los objetos parecen no tener color.

La membrana fotosensible de los bastones está formada por una pila ordenada de discos, dispuestos en el interior de una membrana superficial independiente; el conjunto semeja una pila de monedas encerradas en un tubo de ensayo. Por el contrario, en los conos la membrana fotosensible es una lámina ancha, de complejos pliegues, que hace también las veces de membrana superficial. La topología de la membrana de los bastones indica que una sustancia difusible, un "transmisor interno", acarrea la información desde los discos, donde se absorbe la luz, hasta la membrana superficial, donde se genera la señal eléctrica. Según los datos obtenidos en diversos laboratorios, el transmisor es un nucleótido, el monofosfato cíclico de guanosina (GMPc), que también interviene en la transmisión en los conos.

¿Cómo se origina la señal eléctrica a partir de la absorción de la luz en un bastón o en un cono? La respuesta exige conocer previamente cómo se comporta el fotorreceptor en completa oscuridad. Se diría que, en ausencia de luz, la célula habría de encontrarse paralizada; la verdad es que la célula pre-

1. BASTONES Y CONOS de la retina de la salamandra tigre, aumentados 2000 diámetros en una imagen tomada al microscopio electrónico de barrido por Scott Mittman y Maria T. Maglio, de la Universidad de California en San Francisco. Las células cilíndricas son bastones y, las de apariencia cónica, de menor tamaño, conos. Los fotorreceptores de la retina humana son cuatro veces menores.

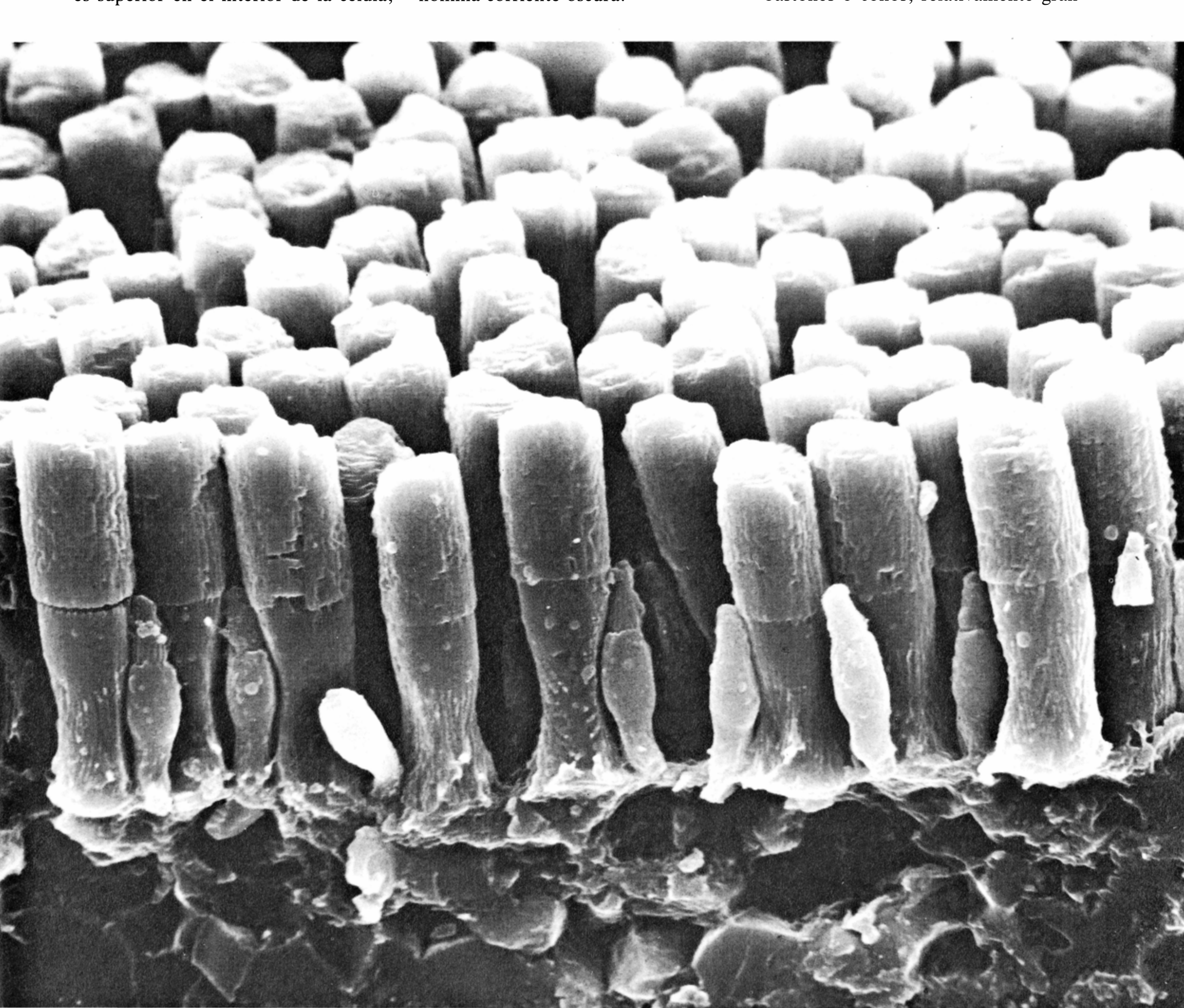
senta en esa situación una actividad muy intensa. La membrana de un fotorreceptor, igual que la membrana de otras células, separa soluciones que poseen diferentes concentraciones de iones (átomos con carga eléctrica neta). Las soluciones externa e interna de un fotorreceptor contienen iones de sodio e iones de potasio, ambos cargados positivamente. En el exterior de la célula, la concentración de iones de sodio es alta y, la de iones de potasio, baja; en el interior de la célula sucede lo contrario: la concentración de iones de potasio es alta y la de iones de sodio baja. La actividad de una "bomba", que utiliza energía metabólica para extraer el sodio e introducir el potasio, mantiene esas diferencias de concentración.

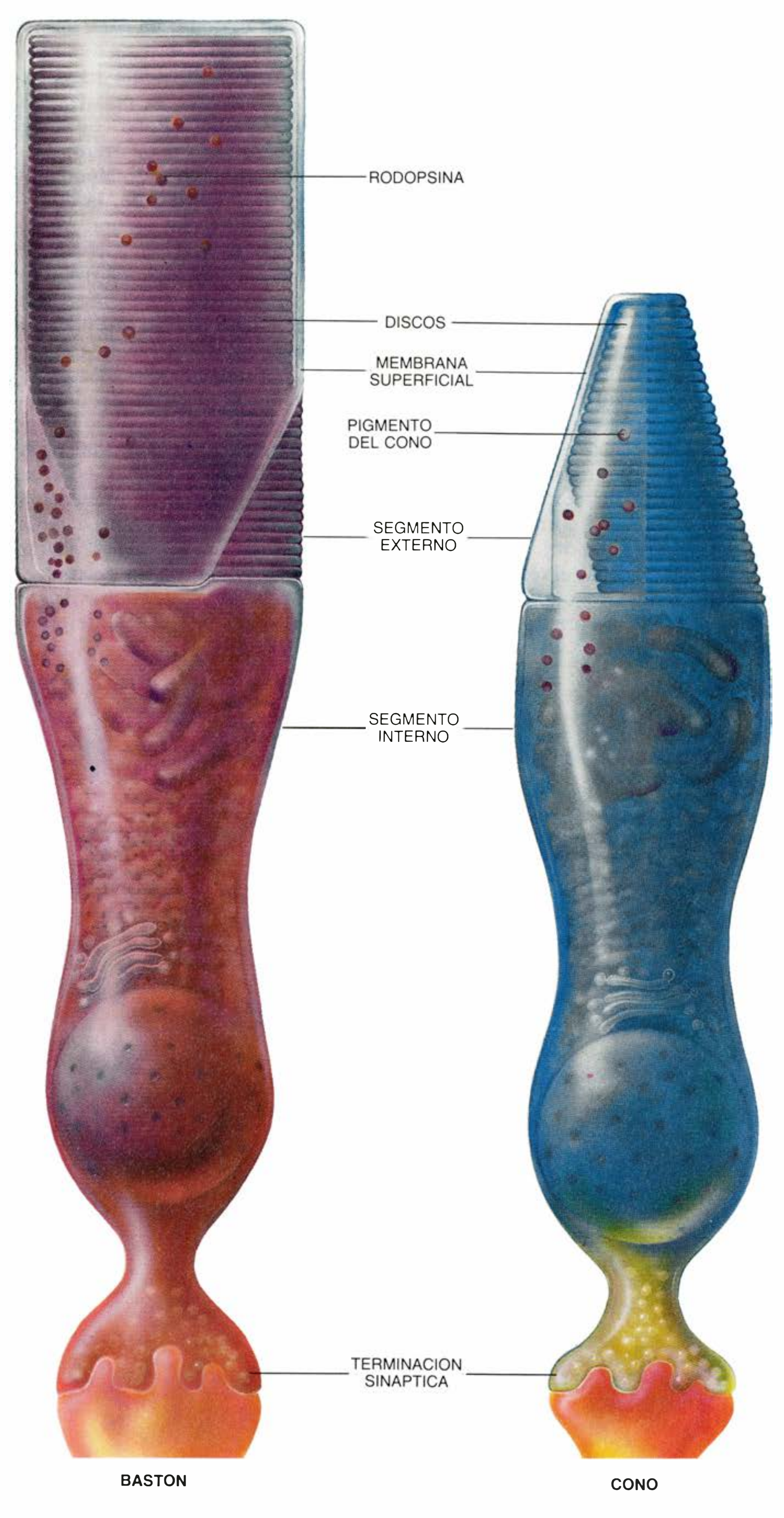
En reposo, las membranas de la mayoría de las neuronas permiten que los iones de potasio las atraviesen con más facilidad que otros iones. Dado que la concentración de los iones de potasio es superior en el interior de la célula, tienden a difundirse a través de la membrana hacia el exterior. Cuando ello ocurre, se registra un movimiento de carga desde la superficie interna de la membrana hacia la externa, por cuya razón el potencial interno deviene negativo respecto del externo, en un valor característico de 0,1 volt. En los fotoreceptores, la permeabilidad a los iones de potasio es más elevada en el segmento interno y en la terminación sináptica.

En oscuridad total, los fotorreceptores presentan también una notable permeabilidad a los iones de sodio, que fluyen desde la solución externa, más concentrada, hacia el interior del segmento externo, generándose una corriente eléctrica dirigida hacia el interior. La corriente de entrada se equilibra con otra de salida de iones de potasio desde el resto de la célula. Ese circuito de corriente se denomina corriente oscura.

Cuando un bastón o un cono absorben luz, se bloquea la entrada de sodio. Ello disminuye la corriente oscura y permite que aumente la polarización negativa del interior celular. El viraje negativo del potencial de transmembrana recibe el nombre de hiperpolarización y, de fotocorriente, la disminución de la corriente oscura. Hacia 1970, William A. Hagins, Richard D. Penn y Shuko Yoshikami, del Instituto Nacional de Artritis y Enfermedades Metabólicas, describieron por primera vez la corriente oscura y la fotocorriente. Midieron las corrientes generadas en una amplia población de bastones.

La hiperpolarización inducida por la luz se inicia en el segmento externo, pero se extiende hacia la terminación sináptica, donde se transmite a otras células de la retina. Se puede registrar la hiperpolarización con un microelectrodo implantado en el interior de los bastones o conos, relativamente gran-





2. BASTONES Y CONOS exhiben formas y funciones distintas, pero presentan ciertas similitudes. La parte superior de ambas células, denominada el segmento externo, contiene moléculas de un pigmento que absorbe la luz; la parte inferior, el segmento interno, contiene mitocondrias y el núcleo. La terminación sináptica une los fotorreceptores a otras células de la retina que, por medio de una compleja red, envían las señales al cerebro. Los bastones intervienen en la visión con poca luz y, los conos, en la visión a plena luz del día. En la retina humana existen tres tipos de conos, cada uno de los cuales posee un pigmento que absorbe intensamente en las regiones azul, verde o roja del espectro; ello es el fundamento de la visión cromática.

des, que se encuentran en la retina de ciertos peces, anfibios y reptiles. A mediados de la década de 1960, Tsuneo Tomita y sus colaboradores, de la Universidad japonesa de Keio, iniciaron ese tipo de experimentos. Los registros muestran que el potencial de transmembrana era de unos −40 milivolt (mV) en la oscuridad. Un destello de luz produce una hiperpolarización que aumenta con la intensidad del mismo. Después de un destello fuertemente luminoso, la respuesta alcanza un máximo de unos 30 mV, con el que el potencial de membrana se sitúa en los −70 mV.

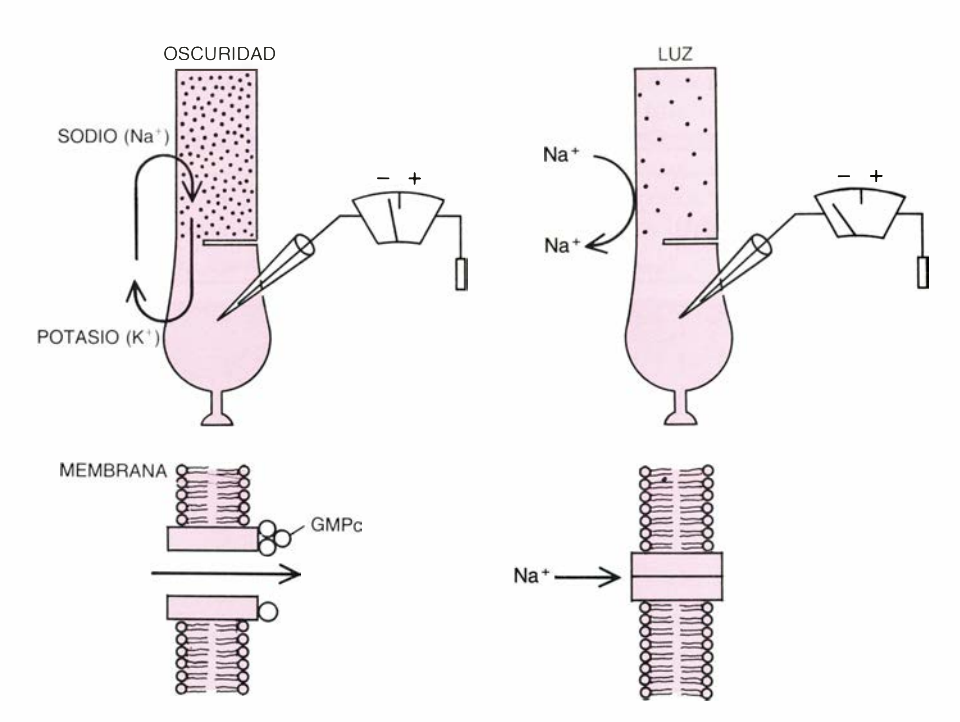
En 1975, Robert Fettiplace y uno de los autores (Baylor) demostraron, en la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, que la hiperpolarización era necesaria y suficiente para controlar el flujo de información que se transmitía a otras neuronas visuales a través de las sinapsis. Nuestro objetivo era tanto estimular como impedir la hiperpolarización inducida por la luz, para lo cual nos servíamos de un electrodo intracelular por medio del cual inducíamos una corriente eléctrica en un solo fotorreceptor. Simultáneamente controlábamos las respuestas de otra célula, la llamada célula ganglionar, situada, en la cadena de neuronas de la retina, en una posición algo más alejada. Mediante la hiperpolarización artificial del fotorreceptor en la oscuridad conseguimos reproducir la respuesta de la célula ganglionar a la aplicación de un pequeño punto luminoso al fotorreceptor. Más aún, la célula ganglionar no presentaba respuesta cuando, por inyección de una corriente despolarizante, bloqueábamos la hiperpolarización inducida por la luz.

¿Cuál es el mecanismo por medio del cual la absorción de luz bloquea la entrada de iones de sodio en el segmento externo? En la oscuridad, los bastones y los conos presentan una elevada concentración de monofosfato cíclico de guanosina, que se une a los poros de la membrana superficial y los abre, permitiendo la entrada de iones de sodio. A la luz, cae la concentración de GMPc, que abandona las zonas de unión, y los poros se cierran. En consecuencia, la permeabilidad de la membrana a los átomos de sodio disminuye y la membrana se hiperpolariza.

La cadena de procesos moleculares que culmina con la reducción del GMPc consta de tres pasos. Hace algunos años, George Wald y sus colegas, de la Universidad de Harvard, demostraron que los bastones y los conos

poseían un componente que absorbía la luz, el denominado 11-*cis* retinal, asociado a una proteína que "sintonizaba" la absorción con una región determinada del espectro visible; el pigmento de los bastones, la rodopsina, y los tres pigmentos de los conos estaban formados por proteínas diferentes. Cuando el retinal de la rodopsina absorbe un fotón de luz, cambia su configuración y la proteína que forma parte de la molécula se activa enzimáticamente. Como demostraron posteriormente Lubert Stryer y sus discípulos, de Stanford, en su forma activada la rodopsina activa catalíticamente muchas moléculas de la proteína que llamaron transducina. Las moléculas de transducina activada, a su vez, activan una enzima que escinde el GMPc. El sistema se comporta como un fotomultiplicador químico. La absorción de un fotón por parte de la rodopsina desencadena la rápida ruptura de cientos de moléculas de GMPc y bloquea la entrada de un millón de iones de sodio.

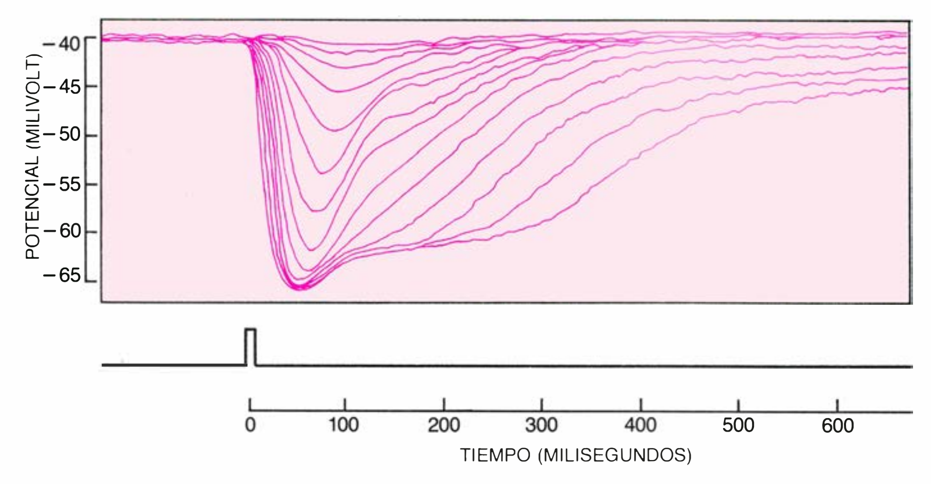
Recientemente, Evgeniy Fesenko y sus colegas, de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética, han obtenido pruebas concluyentes que confirman que el GMPc controla el transporte de iones de sodio a través de la membrana superficial. Aplicaron una pipeta de parche —un capilar de vidrio con un extremo que mide aproximadamente un micrometro (la millonésima parte de un metro) de diámetro— a la membrana superficial del segmento externo de un bastón de retina de rana. Ejerciendo una succión suave con la pipeta y retirándola rápidamente obtenían el fragmento de membrana que se había adherido al extremo. Descubrieron que, si exponían dicho fragmento a GMPc, se hacía permeable al sodio.



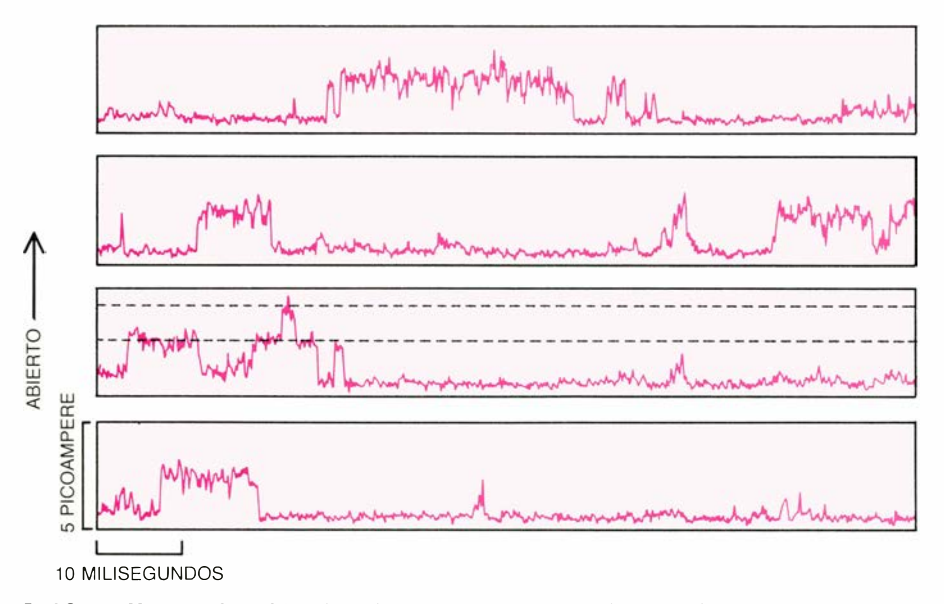
3. RESPUESTA ELECTRICA A LA LUZ de un bastón o un cono, fruto de la reducción de la permeabilidad del segmento externo de la membrana superficial a los iones de sodio. En la oscuridad, los iones de sodio, que portan carga positiva, fluyen hacia el interior de la célula y reducen la densidad negativa de la carga en el interior de la membrana celular (*arriba, a la izquierda*). El flujo de iones de potasio hacia el exterior, a través del segmento interno y de la terminación sináptica, completa el circuito permanente de "corriente oscura". La acción del monofosfato cíclico de guanosina (GMPc), cuya concentración en la oscuridad es elevada (*punteado*), mantiene alta la permeabilidad al sodio. En la oscuridad, a los poros se unen varias moléculas de GMPc, lo que los mantiene abiertos (*abajo, a la izquierda*). En la luz, la concentración de GMPc desciende, el nucleótido se retira de las zonas de unión y los poros se cierran (*abajo, a la derecha*). De ese modo se bloquea el flujo de iones de sodio hacia el interior y el potencial interno de la célula se hiperpolariza.

No se aclaró el mecanismo molecular del movimiento de sodio regulado por GMPc hasta que Anita Zimmerman, de nuestro laboratorio, y Lawrence Haynes y King-Wai Yau, de la Sección Médica de la Universidad de Texas en Galveston, consiguieron demostrar que la corriente que atraviesa una zona permeable puede superar el millón de iones de sodio por segundo. Tal flujo supera en dos órdenes de magnitud la tasa a la que trabajan las moléculas transportadoras de la membrana, que deben cambiar su configuración para transportar uno o unos pocos iones por vez. La existencia de un flujo tan intenso demostraba que los iones cruzaban la membrana difundiéndose a través de poros rellenos de agua. Al parecer, la unión de tres o más moléculas de GMPc desencadenaba la apertura de un poro. En otras palabras, los poros se comportaban como interruptores moleculares de gran eficacia, diseñados para detectar cambios infinitesimales de la concentración de GMPc.

En condiciones adecuadas, un bastón de la retina humana es capaz de notificar la absorción de un solo fotón, que activa exclusivamente una de los 100 millones de moléculas de rodopsina que posee esa célula. A principios de los 40, Selig Hecht, Simon Shlaer y Maurice H. Pirenne, de la Universidad de Columbia, demostraron por primera vez, valiéndose de experimentos psicofísicos, ese comportamiento singular. Dirigían débiles destellos de luz hacia el ojo de un sujeto que se encontraba



4. RESPUESTAS DE HIPERPOLARIZACION DEL POTENCIAL de un cono rojo de retina de tortuga, registradas por medio de un electrodo intracelular. Las líneas representan las respuestas, superpuestas, a destellos breves de intensidad creciente. La diferencia del potencial de transmembrana se traza en función del tiempo transcurrido después del destello, señalado en el eje inferior. Las intensidades de los destellos se aumentaban en un factor de dos; el destello más débil activaba una cincuentena de moléculas del pigmento que absorbía la luz en el cono. Los destellos más luminosos saturaban la amplitud de la respuesta en un máximo de casi 30 milivolt, alcanzando el potencial de membrana un valor aproximado de −65 milivolt.



5. CORRIENTE ELECTRICA de intensidad mensurable que se obtiene al abrirse un poro del segmento externo de un bastón. Se expuso un fragmento de membrana de bastón de salamandra a una solución con GMPc, aumentándose el potencial de membrana hasta +75 mV. Las flexiones ascendentes de los trazos corresponden a las aperturas de los poros. En la tercera gráfica se abren simultáneamente dos poros. Para aumentar la resolución de las mediciones se redujo notablemente las concentraciones de calcio y magnesio.

sentado en completa oscuridad. Variando la intensidad del destello descubrieron que el sujeto solía percibirlo cuando se absorbían sólo siete fotones. Puesto que esos fotones los absorbía una población de 500 bastones, y según un patrón espacial estocástico, no existía posibilidad virtual de que algún bastón hubiera absorbido más de un fotón.

¿Cuál es la amplitud y la forma de la señal eléctrica emitida por la absorción de un fotón? ¿Qué probabilidad hay de que se envíe tras la absorción? ¿Se dan señales similares en la oscuridad? A principios de los 70, científicos de varios laboratorios intentaban registrar el potencial cuántico de respuesta de los bastones. Los esfuerzos iniciales fracasaron. Y ello porque los bastones "reúnen" sus señales: un tipo de uniones especializadas, las uniones en hendidura, ponen en conexión los bastones adjuntos y permiten que las corrientes eléctricas fluyan libremente por sus interiores. La respuesta de hiperpolarización debida a un solo fotón se distribuye así entre diez o más bastones, haciéndose demasiado pequeña para detectarla.

Para resolver el problema de la reunión, Yau, Trevor D. Lamb y uno de nosotros (Baylor) decidimos utilizar un indicador diferente de la respuesta de los bastones. Medimos la fotocorriente del bastón en lugar de su voltaje. Nuestra táctica acertó: la fotocorriente es independiente del potencial de la membrana y, por tanto, no la afectan las reuniones entre bastones.

Para identificar la respuesta a un solo fotón observamos la respuesta de un bastón a la luz muy tenue. En primer lugar trabajamos con bastones de retina de sapo; más recientemente, en colaboración con Brian J. Nunn, de Stanford, hemos utilizado bastones y conos de retina de macacos (*Macaca fascicularis*). Para efectuar las mediciones aspirábamos un segmento externo al interior de un tubo capilar de vidrio muy ajustado. Con un amplificador sensible conectado al capilar, registrábamos luego la fotocorriente del bastón.

Sobre el bastón lanzábamos repetidamente destellos tan débiles que, por término medio, sólo activaban una molécula de rodopsina. La fotocorriente resultante presentaba variaciones: tomaba valores cercanos a cero, uno, dos o tres picoampère (billonésimas de ampère). Tal variación no resultaba sorprendente, ya que la emisión de fotones desde la fuente fluctuaba de forma aleatoria: algunas veces, el destello no conseguía activar ninguna molécula de rodopsina, mientras que otras activaba una, dos o tres moléculas. El análisis estadístico y la calibración de la intensidad del destello demostraron que la activación de una sola molécula de rodopsina desencadenaba una respuesta de un picoampère. El tamaño y la forma de la respuesta resultaban sorprendentemente constantes, señal de que la ganancia de la cascada enzimática estaba sometida a un control muy estricto. Asimismo, las medidas sugerían que era elevada —aproximadamente del 50 por ciento— la probabilidad de que, tras su absorción, un fotón desencadenara una respuesta.

El recuento de fotones por parte de los bastones es impresionante, pero no es perfecto. Incluso en oscuridad total, los bastones lanzan ocasionalmente señales idénticas a las que se disparan por absorción de un fotón. Por ejemplo, en un bastón de retina de mono aparecen señales aleatoriamente, a razón, por término medio, de una cada dos minutos y medio. Al parecer, esas señales son consecuencia de que la energía térmica, el calor, es capaz de activar las moléculas de rodopsina igual que la luz. Tal proceso establece el límite de la capacidad de los bastones para codificar fidedignamente la luz muy tenue. Sin embargo, y por fortuna, la activación térmica procede muy despacio: considerando la frecuencia de las señales y el número de moléculas de rodopsina que contiene un bastón, dedujimos que la vida media del proceso, a la temperatura corporal, era de 420 años. (Las señales erróneas pueden estudiarse experimentalmente porque los bastones se encuentran repletos de moléculas de rodopsina.) No obstante, el sistema visual recibe esas señales y, aun en oscuridad absoluta, puede tenerse la sensación de captar una luz muy tenue. Los psicofísicos han cuantificado esa "luz oscura", obteniendo una tasa de activación similar a la que hemos medido.

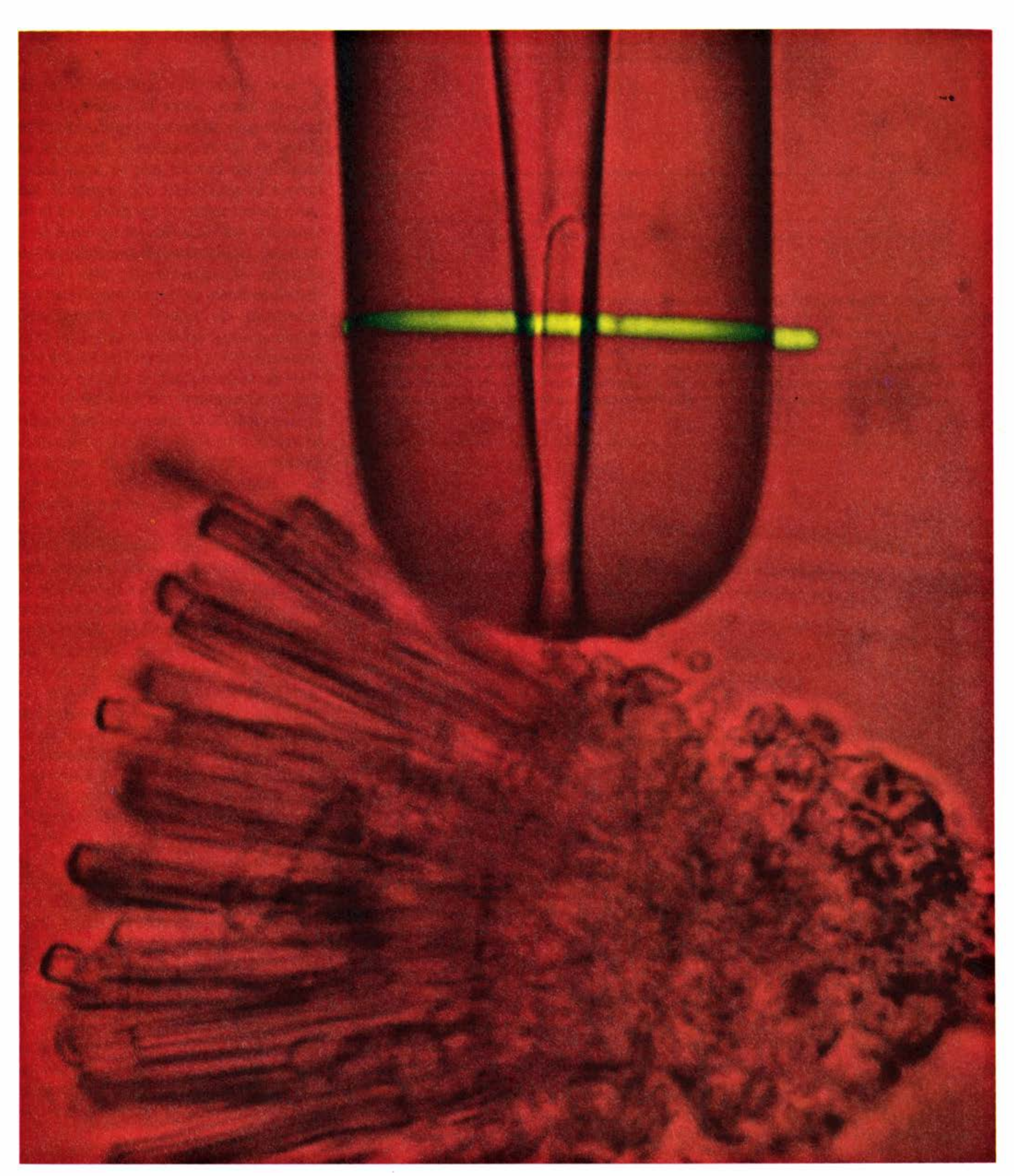
No puede medirse la respuesta de un cono a un fotón aislado, porque es demasiado pequeña; la ocultan las fluctuaciones de fondo. Puede, no obstante, estimarse la respuesta cuántica conociendo la respuesta de un cono a destellos que activen gran parte de sus moléculas de pigmento. Calculamos que el fotón que absorba un cono produce una fotocorriente de unos 10 femtoampère (10×10^{-15} ampère), lo que resulta unas 100 veces menor que la respuesta cuántica de un bastón. La diferencia de magnitud característica de las respuestas ayuda a comprender por qué en el hombre la visión diurna, mediada por los conos, es menos sensible que la visión nocturna, mediada por los bastones.

Por el contrario, la respuesta cuántica de un cono resulta ser unas cuatro veces más rápida que la de un bastón. Por ejemplo, el bastón de un primate tarda 300 milisegundos en informar de la absorción de un fotón. Los conos, por su mayor velocidad de respuesta, están mejor capacitados para codificar estímulos visuales que presentan variaciones rápidas.

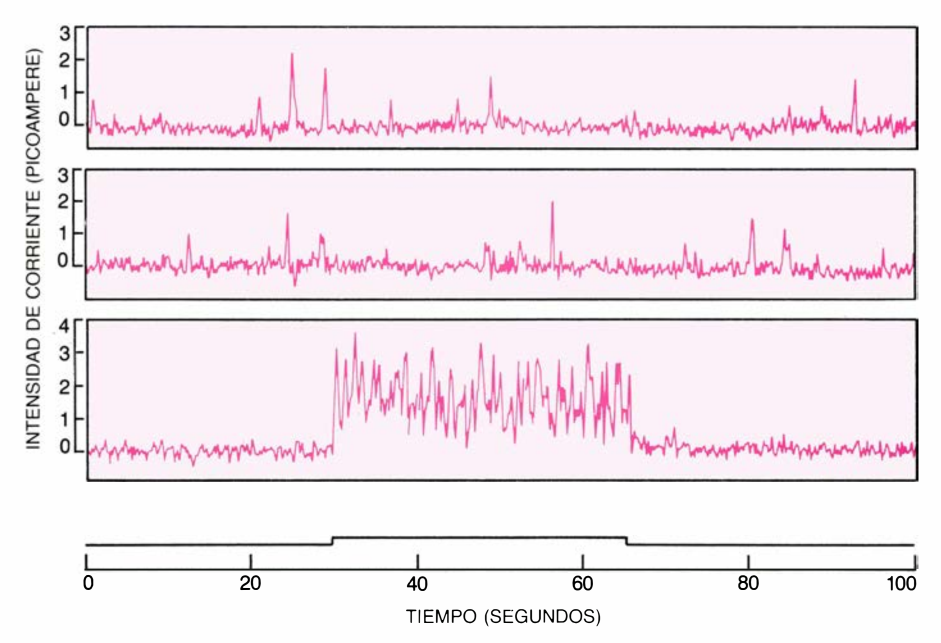
En consecuencia, parece que en la transmisión visual interviene un equilibrio entre la sensibilidad y la resolu-

ción temporal. Las respuestas cuánticas de los conos, pequeñas y rápidas, permiten que el sistema visual detecte cambios de intensidad rápidos, o movimientos rápidos de objetos, cuando el grado de iluminación es elevado y los bastones están saturados. Por el contrario, las señales de los bastones, más lentas y de magnitud superior, resultan idóneas para el recuento de fotones cuando el grado de iluminación es bajo.

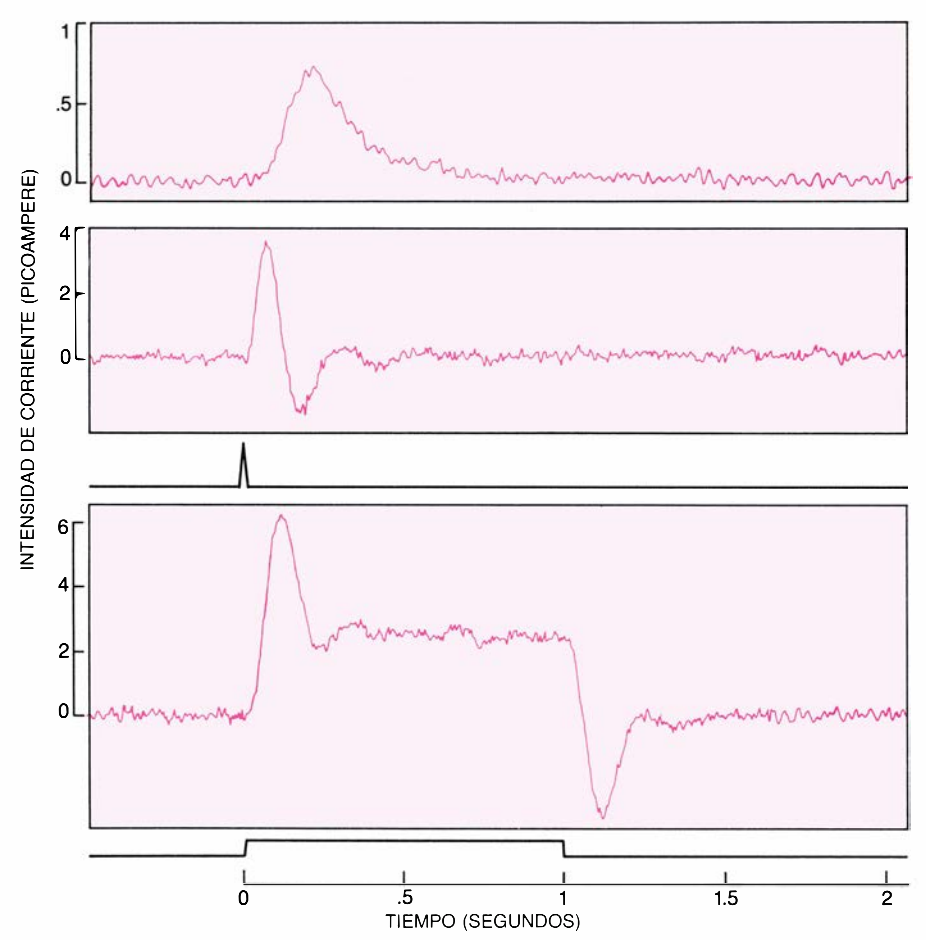
La sensibilidad visual aumenta notablemente a niveles bajos de iluminación porque se conmuta de la visión por conos a la de bastones. Por ejemplo, la ceguera que sufrimos al entrar en una habitación débilmente iluminada es fruto de la escasa sensibilidad del sistema de los conos. Paulatinamente, el sistema de los bastones incrementa su



6. SEGMENTO EXTERNO DE UN BASTON de sapo recogido en el interior de una pipeta de succión para registrar las corrientes eléctricas inducidas por la luz. Mide alrededor de 50 micrometros (millonésimas de metro) de longitud y unos 6 micrometros de diámetro. Se estimula el bastón del anfibio mediante la rendija transversal de luz, amplificándose y registrándose la respuesta eléctrica. Para evitar la adaptación de la célula a la oscuridad, el experimento se realiza bajo luz infrarroja y se observa por un monitor de vídeo. El fragmento de retina es del sapo *Bufo marinus*. (La fotografía es obra de los autores.)



7. RESPUESTA DEL BASTON DE MONO a un fotón, monitorizada introduciendo la célula en una pipeta de succión. En la gráfica superior se estimulaba el segmento externo con destellos débiles que, por término medio, activaban una molécula de pigmento. La respuesta del bastón fluctuaba, variando su amplitud desde cero hasta uno o dos picoampère. La activación de una sola molécula de pigmento insta una respuesta de aproximadamente un picoampère; las fluctuaciones de amplitud son consecuencia de variaciones aleatorias en la emisión de fotones por parte de la fuente de luz. La gráfica inferior muestra la respuesta del mismo bastón a una luz tenue y permanente que de ese modo activaba unas 10 moléculas de pigmento por segundo.



8. ONDULACION DEL EFECTO DE FOTON UNICO en un bastón y un cono de retina de macaco, deducida obteniendo la media de las respuestas a destellos tenues. Los cambios de la intensidad de corriente a través de la membrana se trazan en función del tiempo transcurrido después del destello. La respuesta del bastón (*arriba*) se provocaba mediante un destello que activaba, por término medio, una molécula de pigmento; la respuesta del cono (*centro*) se desencadenaba por un destello que activaba unas 200 moléculas. (Esa respuesta constituye una versión a mayor escala de la respuesta a un solo fotón.) La gráfica inferior muestra la respuesta del cono a un pulso de luz de un segundo de duración. (Dibujos de Alan D. Iselin.)

sensibilidad y, conforme asume el papel principal, los objetos van haciéndose visibles. Sin embargo, incluso en visión estrictamente de bastones, la sensibilidad aumenta conforme disminuye el nivel de luz de fondo. ¿Se produce ese cambio de sensibilidad en los propios bastones, o acaso en otras neuronas que procesan las señales de éstos?

Cabe determinar el efecto de la luz de fondo sobre la sensibilidad de los bastones de primate mediante el registro de las respuestas a destellos tenues de un bastón que se haya adaptado a la oscuridad. La amplitud máxima de la respuesta se divide por la intensidad del destello, obteniéndose la medida denominada sensibilidad de destello. Posteriormente van encendiéndose luces de fondo continuas y se determina de nuevo la sensibilidad, que disminuye conforme aumenta la intensidad de las luces de fondo. La pérdida de sensibilidad se explica por un simple mecanismo de saturación. Con el aumento de la intensidad del fondo, se van cerrando canales de sodio de la membrana superficial, y de ese modo se va también restringiendo el número de canales que puede cerrar el destello de luz.

En experimentos psicofísicos donde se determinaba la intensidad de un destello que apenas resulta detectable en presencia de una luz de fondo difusa se ha medido la sensibilidad del sistema humano de bastones. Conforme aumentaba la intensidad del fondo disminuía la sensibilidad al destello. Sin embargo, un fondo que provoque una grave caída de sensibilidad visual de los bastones puede que afecte escasamente la sensibilidad medida en un único bastón. A modo de ejemplo: una luz fija que activa 40 moléculas de rodopsina por segundo y por bastón divide por 10.000 la sensibilidad de la visión de los bastones, pero reduce sólo alrededor del 20 por ciento la sensibilidad del segmento externo de los bastones. Esas mediciones corroboran la conclusión a que llegó William A. H. Rushton, de la Universidad de Cambridge, según el cual en el ser humano la pérdida de sensibilidad óptica de los bastones secundaria a la luz de fondo debíase a un procesamiento nervioso posterior al segmento externo del bastón. No se ha determinado aún el mecanismo de tal efecto.

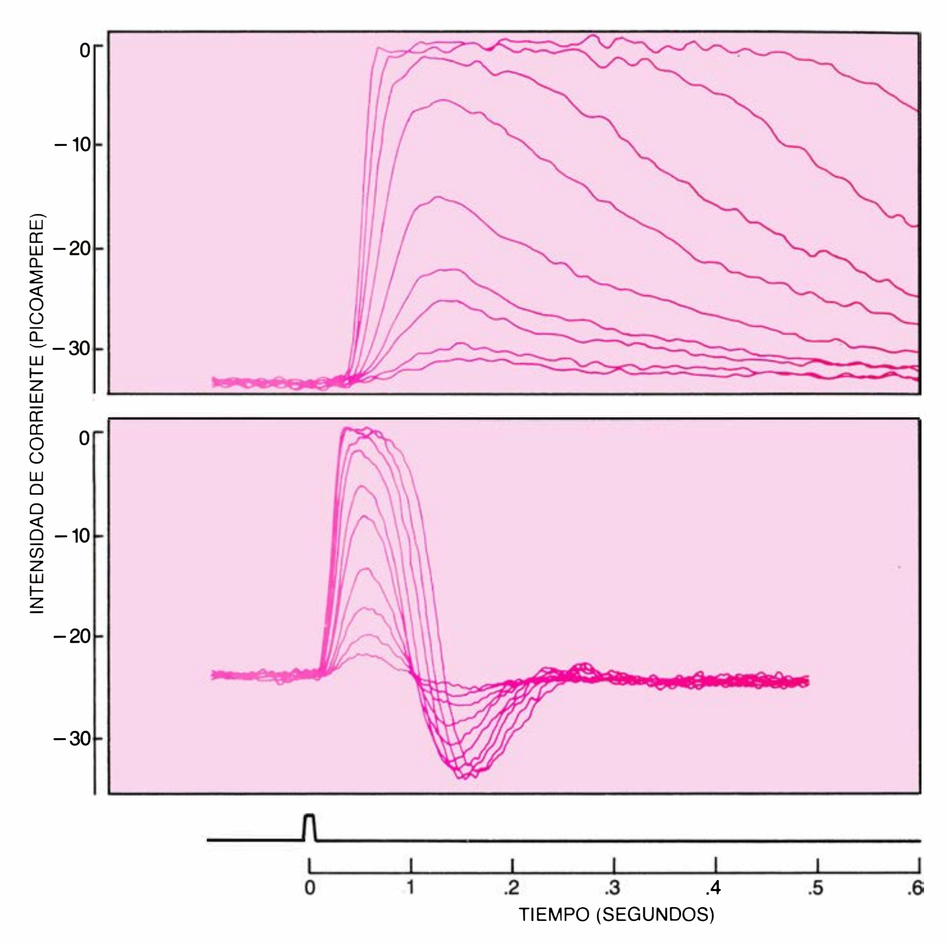
Cuando la intensidad del fondo excede del grado que corresponde aproximadamente al del cielo despejado de mediodía, la sensibilidad al destello por

parte de los bastones humanos cae bruscamente: se ha saturado. Con una luminosidad de tal intensidad, el sistema visual no detecta los cambios del ritmo con el que los bastones absorben fotones. Las mediciones eléctricas demuestran que los bastones dejan de responder al destello aproximadamente a la intensidad de fondo a la que se satura la visión global de los bastones. Por tanto, ese límite de visión expresa una propiedad de la transmisión por parte de los bastones.

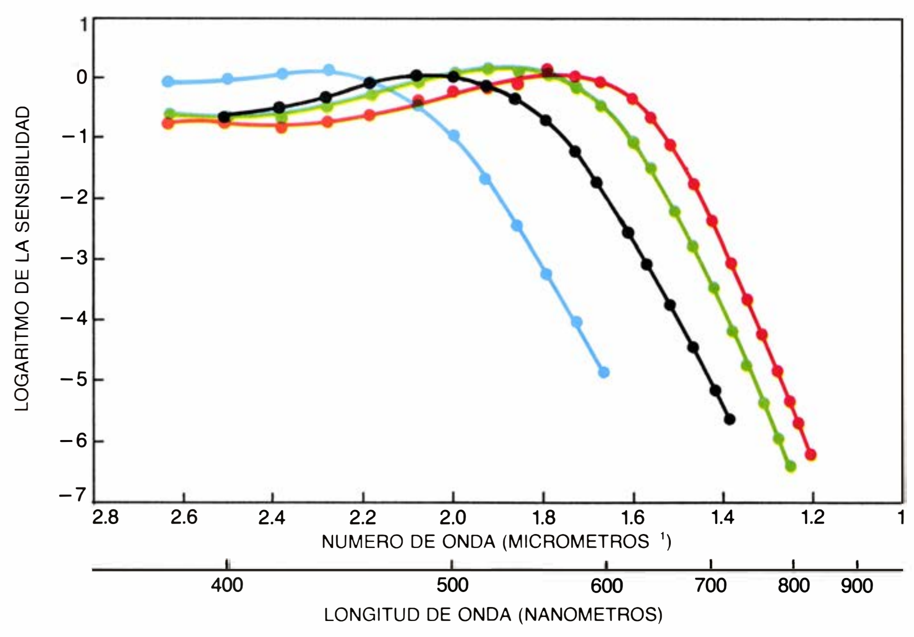
La sensibilidad de un fotorreceptor a la luz de diferentes longitudes de onda viene dada por la probabilidad de que su pigmento visual absorba fotones de esas longitudes de onda. Las mediciones de la sensibilidad espectral en células aisladas del macaco, cuyos fotorreceptores son como los del ser humano, constituyen una base fisiológica para determinar las características espectrales de la visión en el hombre. Las longitudes de onda de la luz visible se encuentran aproximadamente entre los 400 y los 750 nanómetros (milmillonésimas de metro). Los pigmentos visuales absorben muy poca luz de longitud de onda más larga (próxima al infrarrojo). Sí podrían absorber la luz de longitud de onda más corta (próxima al ultravioleta), pero esa luz no alcanza la retina, porque antes la absorben la córnea y el cristalino.

Los bastones del macaco presentan una sensibilidad máxima en la región azul verdosa del espectro, localizada alrededor de los 490 nanómetros. Valoración de la sensibilidad espectral que no está en desacuerdo con la sensibilidad espectral de la visión de los bastones en el ser humano determinada en los experimentos psicofísicos.

Los conos del mono se dividen en tres grupos, cuyas sensibilidades máximas se sitúan alrededor de los 430, 530 y 560 nanómetros. Tales grupos, que se corresponden con bastante exactitud con los del ser humano, pueden denominarse azul, verde y rojo, para denotar las posiciones relativas de los máximos en el espectro. Cada tipo de cono es sensible a la luz de un amplio rango de longitudes de onda; las sensibilidades de los tres grupos se solapan considerablemente. Sin embargo, la distribución de los pigmentos en los conos apropiados parece ser muy estricta. Observando la forma de las curvas de sensibilidad, dedujimos que las moléculas de pigmento de tipo rojo o verde de un cono de tipo azul no superaban la proporción de una por cada 100.000 moléculas.



9. CORRIENTES DE MEMBRANA del bastón (*arriba*) y el cono (*abajo*) de un mono, registradas con una pipeta de succión. Se iluminaban uniformemente los segmentos externos con destellos de luz. Los registros, superpuestos en esta ilustración, muestran la intensidad de corriente del segmento externo en función del tiempo que sigue al destello. La intensidad de los destellos se duplicaba sucesivamente hasta que las respuestas alcanzaban su máxima amplitud y cesaba por completo la corriente dirigida hacia el interior. En el bastón, la respuesta alcanzaba la mitad de su máximo valor cuando se activaban 30 moléculas de rodopsina; en el cono, la respuesta era la mitad de su valor máximo cuando se activaban 1200 moléculas de pigmento.



10. SENSIBILIDAD RELATIVA A UN FOTON en bastones y conos de macaco, trazada en función de la longitud de onda del fotón. Las sensibilidades espectrales son muy similares a las de los receptores del ser humano. La curva negra representa el espectro de los bastones y las curvas roja, verde y azul, recogen, respectivamente, los espectros de los conos rojos, verdes y azules, fundamento de la visión cromática.

La respuesta de un cono no depende de la longitud de onda del fotón que absorbe; los estímulos que se absorben del mismo modo desencadenan respuestas idénticas. Sin embargo, el sistema visual es capaz de deducir el color a partir de la longitud de onda tomando nota de la proporción en que se excitan los tres tipos distintos de conos. Desde hace años se sabe, por experimentos psicofísicos, que dos estímulos de distinta longitud de onda parecerán idénticos si evocan el mismo número de absorciones por parte de cada tipo de cono. Aunque tales observaciones han establecido consistentemente la tricromacía de la visión en color, no se ha determinado su fundamento exacto, debido a las dudas que subsisten acerca de la sensibilidad espectral específica de los conos. Se conocen las sensibilidades de los conos del mono, y satisface comprobar que predicen las reglas que determinan las intensidades de luz que requiere el ser humano para efectuar las combinaciones de color.

La percepción del color a longitudes de onda largas viene determinada exclusivamente por la absorción relativa de los conos rojos y verdes. Conforme aumenta la longitud de onda, hasta los 600 nanómetros aproximadamente, el color que se percibe va pasando del naranja a un rojo progresivamente más oscuro. Por encima de los 700 nanómetros esa progresión se invierte y el color se torna anaranjado. Giles S. Brindley, de Cambridge, describió en 1955 ese curioso fenómeno, denominado "cambio paradójico de tonalidad", que se explica por la forma de las curvas de sensibilidad espectral de los conos rojos y verdes. La relación de dichas sensibilidades presenta un máximo a los 700 nanómetros, de ahí que esa longitud de onda parezca la más roja.

Se conoce mal el mecanismo molecular de la transmisión visual y el procesamiento central de las señales procedentes de los fotorreceptores. Aun habiéndose identificado el transmisor interno de la excitación visual, queda mucho por avanzar en la cascada de nucleótidos y el control de la permeabilidad al sodio. Queda también mucho por averiguar acerca de la transmisión de las pequeñas señales generadas por la absorción de los distintos fotones, su separación del ruido y su procesamiento por parte del sistema visual. En los próximos años, la experimentación en ese campo científico promete ser copiosa y fructífera.

Los satélites de Urano

El Voyager 2 *fotografió a corta distancia los cinco satélites principales. De superficie helada, son más rocosos y oscuros que los de Saturno. En su temprana historia conocieron una intensa actividad geológica*

Torrence V. Johnson, Robert Hamilton Brown y Laurence A. Soderblom

Imagínese el lector que es un observador residente en Urano, en cuya órbita ha pasado millones de años. Ha sido una época aburrida. Ningún cambio que registrar en su mundo gris; todo se congeló hace ya mucho tiempo. De repente, en un momento como otro cualquiera, observa un punto de luz que se dirige hacia usted desde el Sol. Y se pone a investigar. Lo que descubre resulta casi cómico: un pequeño objeto de metal, un disco con varias protuberancias, muy raras, girando locamente, y todo el artilugio lanzado a extraordinaria velocidad. En lo que a usted le parece un instante, la visión se ha acabado y, de nuevo, se encuentra solo en la serena regularidad establecida por el planeta, sus anillos circulares y sus helados satélites salpicados de cráteres.

Vayamos ahora a California y entremos en el Laboratorio de Propulsión a Chorro. El lector es uno de nosotros, el grupo que lanzó el artilugio metálico, llamado *Voyager 2*, para cumplir su misión. Incluso desde nuestra limitada perspectiva (Urano fue descubierto por William Herschel, hace sólo doscientos años), el paso del *Voyager* junto a Urano, el 24 de enero de 1986, pareció breve. Y lo era en particular para quienes estábamos interesados en los cinco satélites más importantes del planeta, que apenas si son visibles con los grandes telescopios de la Tierra. Cuando el *Voyager 2* se acercó a Urano, a 72.000 kilómetros por hora, no disponíamos ni de un día entero para recoger toda la información posible hasta la fecha sobre dichos satélites, y quizá toda la que tendremos en el futuro: de momento, no hay planes para ulteriores misiones a Urano.

Había que vencer enormes obstáculos técnicos. Originariamente proyectado para operar sólo hasta la distancia a que está Saturno, donde la luz solar es cuatro veces más intensa y donde la reflectividad de los satélites se duplica en promedio, el *Voyager 2* tenía que enfrentarse en Urano con objetivos mucho más débiles que aquéllos para los que estaban preparadas sus cámaras. Para que recibieran suficiente luz y así formar imágenes, los obturadores de éstas tenían que dejarse abiertos durante varios segundos. A menos que se hallara alguna manera de corregir el efecto de los movimientos de la sonda espacial y de los propios satélites, las imágenes saldrían borrosas, sin esperanza de mayor provecho. Algo así como pretender fotografiar un coche de carreras de un color gris oscuro corriendo a gran velocidad en un día cubierto, con una película muy lenta. Con esa dificultad tenía que habérselas el *Voyager 2* y el grupo a su cargo.

Pero aceptamos el desafío. Mientras el vehículo espacial se encaminaba desde Saturno hacia Urano, los ingenieros del Laboratorio de Propulsión a Chorro idearon un método para compensar sus complicados movimientos [véase "Preparando el encuentro del *Voyager 2* con Urano", por Richard P. Laeser, William I. McLaughlin y Donna M. Wolff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1987]. Sus esfuerzos se vieron coronados con imágenes nítidas y de alta calidad de los cinco satélites más importantes de Urano: Oberón, Titania, Umbriel, Ariel y Miranda. En el caso de Miranda, el más interno de los cinco, las imágenes presentaban una resolución superior a todas las obtenidas por los *Voyager 1* y *Voyager 2* en Júpiter y Saturno. Ante esos resultados, el *Voyager 2* no nos parecía cómico o ridículo; como experimento científico, resultó perfecto.

La brevedad del encuentro con Urano no se debía solamente a la velocidad del vehículo espacial, sino también a la extraña geometría del sistema uraniano, inclinado, como está, de lado. En el momento actual, el polo Sur del planeta apunta hacia el Sol y la Tierra. Como las órbitas de los satélites descansan aproximadamente en el plano ecuatorial, la trayectoria del *Voyager 2* a través del sistema semejaba la de una bala que atravesara un blanco de círculos concéntricos. En vez de aproximarse a la vecindad de cada satélite, uno tras otro, como hizo en Júpiter y Saturno, la sonda realizó su paso por el punto más cercano a todos los satélites de Urano casi al mismo tiempo. Para asegurarse de que cada satélite recibía cobertura fotográfica de alta resolución, la secuencia de imágenes tenía que estar planeada al segundo. Pese a ello, y aun con un programa muy cuidadoso, sólo se podía fotografiar la mitad de cada satélite: únicamente los hemisferios meridionales están iluminados por la luz solar.

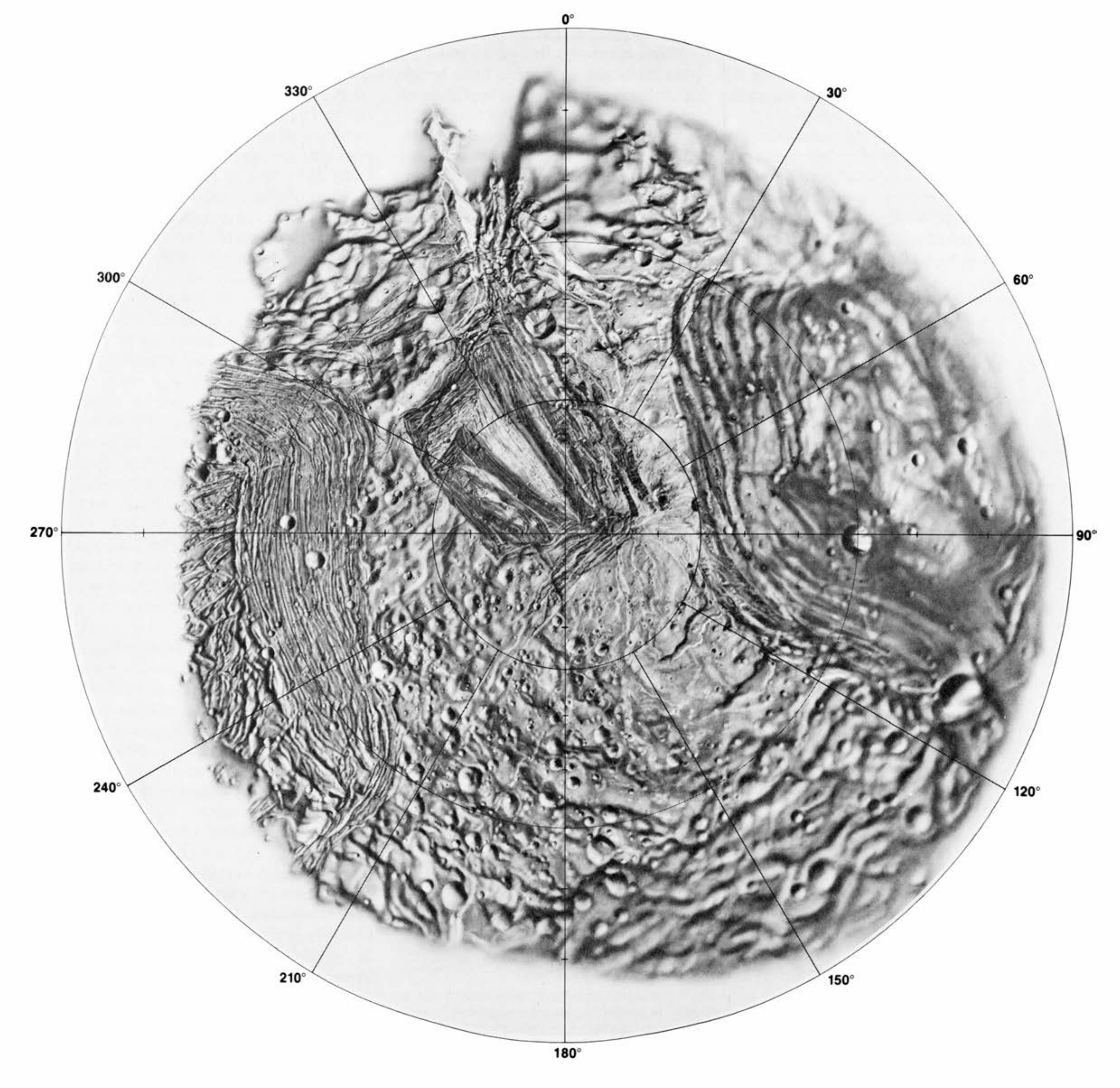
En los meses anteriores al punto de máxima proximidad, se dedicó mucho tiempo de cámara a explorar el plano ecuatorial del planeta, en busca de nuevos satélites. Había buenas razones para sospechar de su existencia: Júpiter cuenta con 16 satélites y Saturno con 17, en su mayoría pequeños objetos invisibles desde la Tierra. El *Voyager 2* halló 10 nuevos satélites de Urano, lo que eleva el total del planeta a 15. Dos de los nuevos satélites son "pastores" gravitatorios, de patrulla por los bordes interior y exterior del

1. ESTE MAPA DE MIRANDA, basado en imágenes del *Voyager 2*, es una proyección estereográfica del hemisferio Sur del satélite. El polo Sur está en el centro; el ecuador, en la circunferencia exterior. Sólo se fotografiaron los hemisferios Sur de los satélites de Urano porque sólo ellos están iluminados. Miranda es el más pequeño y exótico de los cinco satélites principales. Superpuestas a sus llanuras antiguas y salpicadas de cráteres, hay tres regiones más jóvenes y menos craterizadas, de suelo surcado y con crestas, conocidas por "ovoides". La superficie del satélite se halla también entrecruzada por zonas de fractura; la que se ve en la parte superior del mapa contiene un acantilado de entre 10 y 20 kilómetros de altura. El mapa de Miranda y los otros mapas de este artículo fueron preparados por investigadores del Servicio Geológico de los EE.UU.

mayor, y más externo, de los anillos del planeta. Los ocho restantes siguen órbitas circulares entre los anillos y Miranda. Todos los nuevos satélites, salvo uno, tienen diámetros de entre 40 y 80 kilómetros. La excepción, designada con la expresión 1985U1 hasta que la Unión Astronómica Internacional le otorgue un nombre oficial, mide 160 km de diámetro.

El satélite 1985U1, detectado más de un mes antes del encuentro, se hallaba en el mismo lado del planeta que Miranda; ello permitió que los autores y sus colegas pudieran cambiar un intervalo de tiempo de cámara originariamente cedido a Miranda y tomar un primer plano del nuevo satélite. La imagen muestra un objeto algo irregular, con una superficie oscura y salpicada de cráteres que refleja sólo el 7 por ciento de la luz incidente. Los otros nuevos satélites no se observaron desde cerca, pero parecen ser de pareja oscuridad, igual que las partículas que constituyen los anillos.

En ese aspecto no se salen de lo común. En realidad, la mayor parte de la materia sólida del Sistema Solar externo que no es hielo brillante aparece muy oscura, con un albedo, o reflectancia, de un 10 por ciento, si no menos. La naturaleza de esta materia oscura ha sido objeto de debates en los últimos años. La mayoría de los investigadores coincide en sostener que es oscura por su abundancia de carbono, como el hollín. La explicación más inmediata es que se trata de la misma



clase de materia que se encuentra en las condritas carbonáceas, meteoritos primitivos que provienen del cinturón de asteroides situado entre Marte y Júpiter y constan de silicatos hidratados, o arcillas, mezclados con substancias orgánicas oscuras y ricas en carbono. Tales mezclas se forman sólo a temperaturas bastante bajas. Los modelos teóricos sugieren que las condiciones de la primitiva nebulosa solar habrían sido las apropiadas para crear rocas carbonáceas allende el cinturón de asteroides.

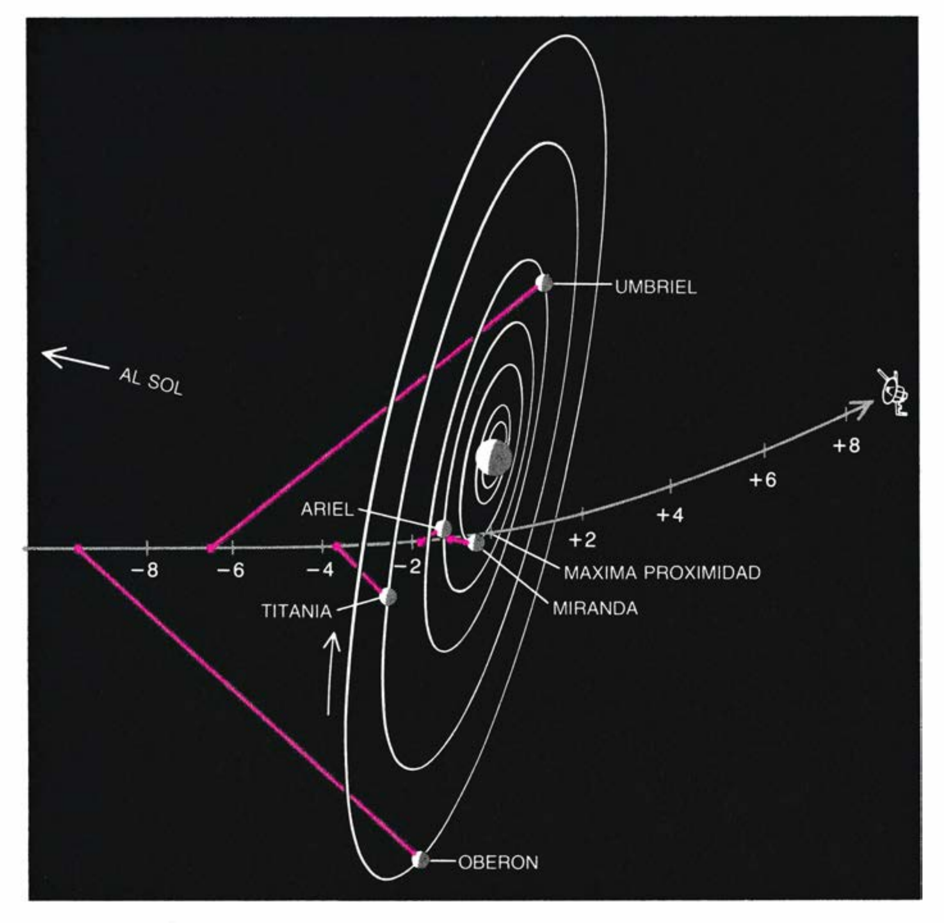
Cabe, por otro lado, que la materia carbonácea no fuera la roca primitiva, sino que hubiera surgido más recientemente, por irradiación de hielo de metano o de hielo de agua contaminado con metano, cuya existencia también se predice en el Sistema Solar exterior. Los estudios de laboratorio han demostrado que la luz ultravioleta o los electrones de gran energía (tales como los del viento solar o los de las magnetosferas planetarias) pueden inducir reacciones en las que el metano forma un oscuro residuo de complejos compuestos orgánicos. Este mecanismo ha sido invocado para explicar la producción de los oscuros granos interestelares, la baja reflectancia de los núcleos cometarios y el peculiar lado oscuro del satélite de Urano llamado Japeto. De hecho, algunos investigadores creen que explica la materia orgánica en las rocas carbonáceas. Si tienen razón, la pregunta acerca del oscurecimiento del metano en el Sistema Solar exterior no será ya saber si ha ocurrido, sino cuándo sucedió: es decir, si era importante sólo hace 4500 millones de años, cuando se formaron las rocas carbonáceas, o si también se produjo más tarde en la superficie de los satélites.

Hasta ahora, no hay razón poderosa para creer que el proceso haya tenido un efecto importante en la superficie de los satélites de Urano. Por una parte, la presencia de metano en los satélites, a diferencia de la del hielo de agua, no ha sido todavía comprobada por observaciones desde la Tierra. (El *Voyager 2* no está equipado con un espectrómetro capaz de analizar la composición de las superficies de los satélites.) A nuestro parecer, la mayor parte de la materia oscura del sistema uraniano es, probablemente, roca carbonácea primitiva, aunque el metano oscurecido puede haberse añadido a la mezcla original en algunos lugares. Experimentos realizados por Roger N. Clark, entonces en la Universidad de Hawai en Manoa, indican que pequeñas cantidades de rocas carbonáceas (menos de un uno por ciento en volumen), cuando se mezclan bien con hielo de agua, son suficientes para oscurecer el hielo brillante, dando por resultado una reflectancia muy baja, del orden del 7 por ciento exhibido por el 1985U1.

Los cinco satélites principales de Urano son mucho menos oscuros que 1985U1; sus albedos varían de un 20 por ciento (Umbriel) a un 40 por ciento (Ariel). La observación es importante. Si se supone que 1985U1 representa la primitiva mezcla de hielo y rocas de la cual se formaron todos los satélites, hay que explicar por qué los satélites mayores resultan más brillantes. La razón estriba en que 1985U1 constituye, verosímilmente, una mezcla homogénea de hielo y roca, mientras que los satélites principales no lo son. Antes bien, han sufrido diversos grados de diferenciación: parte de la roca más densa se ha ido corriendo hacia el centro del satélite y parte del hielo más ligero y brillante ha ido subiendo hacia la superficie. El proceso de diferenciación requiere calor interno, y las fuentes de calor en todos los satélites de Urano se redujeron probablemente a la nada hace largo tiempo. Pero, a juzgar por las imágenes del *Voyager*, los cinco satélites –en particular Ariel y Miranda– parecen haber desarrollado una intensa actividad geológica en los primeros tiempos de su existencia.

Las pruebas de actividad geológica en un satélite helado adquieren varias formas. Si se ha producido una diferenciación en gran escala, pueden verse manchas brillantes y manchas oscuras en la superficie, que corresponden a regiones donde se ha mezclado con el hielo menos roca o bien más roca. Si los movimientos tectónicos fracturaran la corteza del satélite, se apreciarían líneas de falla. Y si la fuente de calor interno alcanzó intensidad suficiente para provocar actividad volcánica, se verían regiones cubiertas por materia bastante joven, expulsada del interior del satélite por las erupciones y arribada, en su flujo, hasta la superficie.

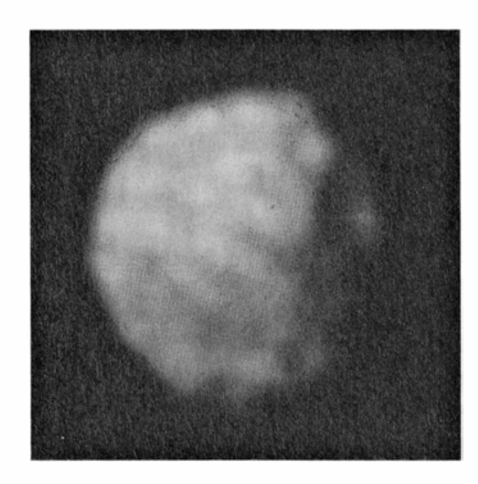
¿Qué significa "joven"? Las únicas referencias de tiempo en la superficie de los satélites son los cráteres excavados por los fragmentos de hielo y



2. LA TRAYECTORIA del *Voyager 2* era casi perpendicular al plano ecuatorial del planeta Urano. Como los satélites describen sus órbitas aproximadamente en el plano ecuatorial, la sonda espacial pasó por el punto de máximo acercamiento a los satélites casi a la vez; dispuso de escaso tiempo para tomar imágenes a corta distancia. Las líneas de colores indican las posiciones y tiempos (medidos en horas antes del punto de máxima proximidad al planeta) en los cuales la nave consiguió las mejores imágenes de los satélites de Urano.

roca que han llovido sobre los satélites desde que se formaron, hace 4500 millones de años. Una región saturada de cráteres es obviamente antigua; una región sin rastro de éstos indica que su superficie se ha recubierto de nuevo material en un pasado geológicamente reciente. Determinar la edad de los accidentes geológicos con mayor precisión, en particular si sus edades caen entre ambos extremos, resulta difícil, pues las velocidades de formación de cráteres han variado de un planeta a otro y no han permanecido constantes en el tiempo. El bombardeo más intenso se produjo cuando los planetas y sus satélites estaban todavía acumulando residuos.

Durante este período temprano, al menos dos poblaciones diferentes de objetos incidentes, correspondientes a dos fuentes de residuos, chocaron contra los satélites del Sistema Solar exterior. La primera población estaba constituida por materia que quedó en órbita alrededor del Sol cuando los planetas se formaron. Los cráteres de esta población se caracterizan por su amplia distribución de tamaños, cuyo diámetro varía desde menos de un kilómetro hasta cientos de kilómetros. Se encuentran en los terrenos más antiguos del Sistema Solar; por ejemplo, en las altiplanicies de nuestra Luna. La segunda población de objetos incidentes estaba integrada por restos en órbita alrededor de los planetas después de la formación de sus satélites. La mayoría de tales objetos eran relativamente pequeños. Antes del encuentro con Urano, los cráteres se habían detectado



3. SISTEMA URANIANO: consta, al menos, de 11 anillos y 15 satélites. Las órbitas se miden desde el centro de Urano, que tiene un radio de 25.600 kilómetros; los satélites están dibujados a escala común. Los cinco satélites mayores eran conocidos antes del paso del *Voyager 2*. De los 10 pequeños descubiertos por la nave, sólo el mayor, 1985U1, se fotografió a corta distancia (*arriba*). Su superficie es más oscura que la de los satélites mayores. El gran cráter que se aprecia cerca del borde derecho mide unos 40 km.

principalmente en los satélites de Saturno, en particular gracias a Robert G. Strom y sus colaboradores de la Universidad de Arizona. Los bombardeos heliocéntrico y planetocéntrico se solaparon, si bien el planetocéntrico parece haber acabado algo después. Este hecho representa una indicación útil acerca de la historia temprana de los satélites de Urano.

Oberón y Titania, los satélites más lejanos y exteriores, miden unos 1600 kilómetros de diámetro (menos de la mitad del tamaño de nuestra Luna) y tienen aproximadamente la misma masa. Sus superficies, ricas en hielo de agua, reflejan entre el 25 y el 30 por ciento de la radiación solar incidente y son de un gris bastante uniforme. El gris sólo queda interrumpido por brillantes rayos alrededor de algunos cráteres; ninguno de los satélites muestra configuraciones globales de manchas oscuras y manchas brillantes. Pese a esas semejanzas, uno y otro evolucionaron de manera distinta.

Oberón presenta accidentes que recuerdan un poco las fallas, aunque muestra escasos indicios de fracturas tectónicas importantes. Su superficie está salpicada de cráteres, grandes y antiguos, cuyo tamaño varía desde el límite de resolución de las imágenes (unos 12 kilómetros) hasta más de 100 kilómetros. La persistencia de los grandes cráteres evidencia que la superficie de Oberón no se cubrió después con nuevo material, ya que el bombardeo heliocéntrico terminó hace unos 4000 millones de años.

Esto no significa que el satélite estuviera completamente inactivo. En el fondo de algunos de los grandes cráteres se observan manchas de materia muy oscura, semejante a la que se ve en 1985U1. La apariencia de los cráteres recuerda a los de fondo oscuro, como Tsiolkolvsky en los altiplanos de nuestra Luna. En ésta, los depósitos oscuros se suponen causados por erupciones volcánicas posteriores a los enormes impactos que excavaron los cráteres. Oberón pudo también haber sufrido alguna temprana actividad volcánica de tipo local. Sus manchas oscuras pueden ser mezcla de hielo y rocas carbonáceas arrojadas del interior por erupciones. Por otra parte, los ríos volcánicos pudieron haber incluido hielo que contuviese metano, el cual se oscureció tras haber alcanzado la superficie.

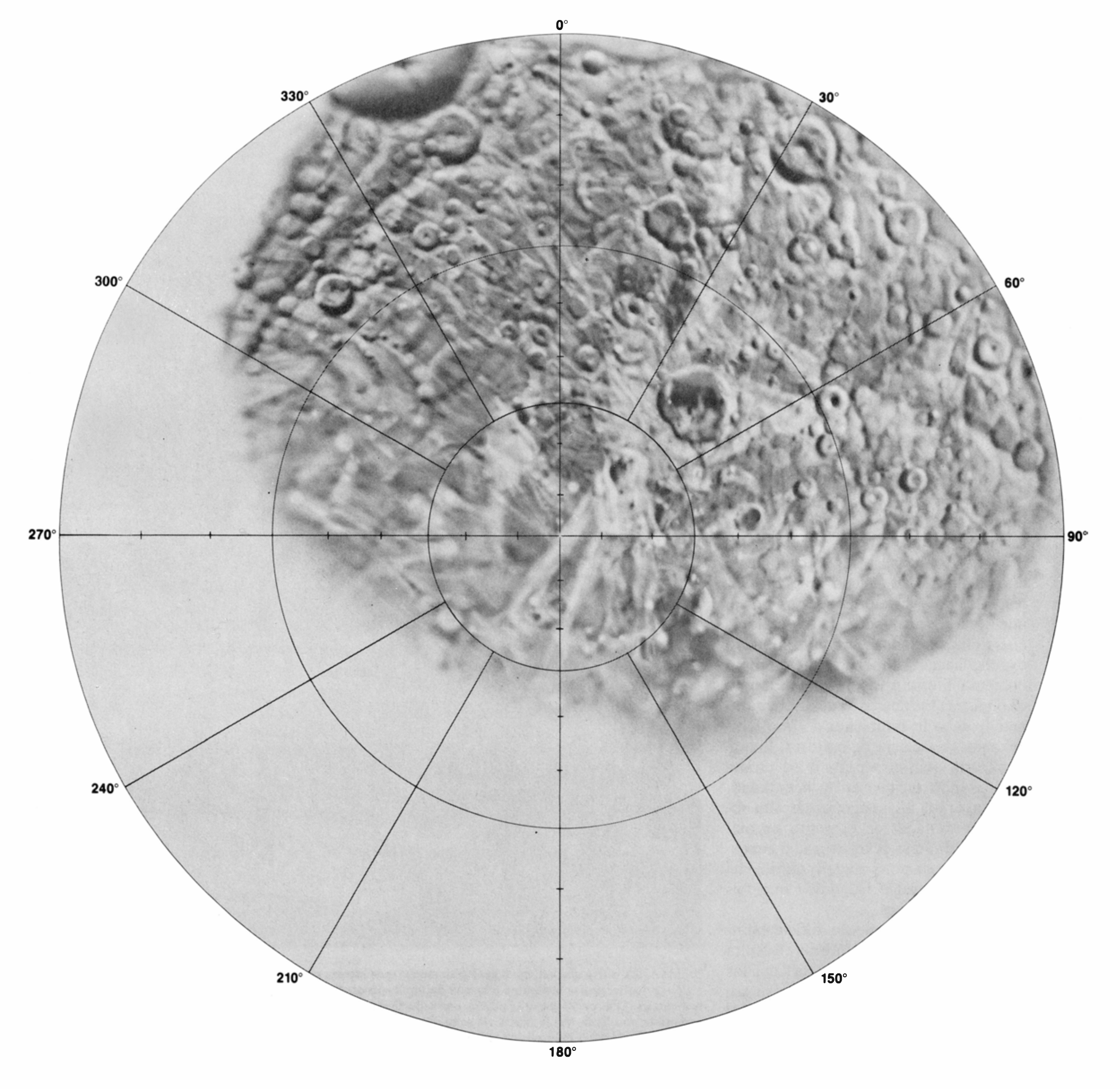
Mientras que Oberón ha sido, en buena medida, un blanco pasivo para los proyectiles incidentes, no ha ocurrido lo mismo con Titania. Su superficie presenta pruebas espectaculares de tectónica global: un complicado conjunto de cubetas o estrechos valles, limitados por fallas de estiramiento. Además, aunque la superficie de Titania está salpicada de numerosos cráteres, los datos de observación sugieren que éstos se produjeron por objetos incidentes de la segunda población, la planetocéntrica. Titania debe haber sufrido un bombardeo de objetos heliocéntricos al menos tan intenso como Oberón y, sin embargo, sólo muestra unos pocos cráteres grandes y atribuibles a dicha población. Evidentemente, la mayoría de los grandes cráteres quedaron borrados por procesos de recubrimiento de la superficie. Además, como la densidad de esos accidentes no es uniforme –hay varias llanuras que son claramente más lisas y menos horadadas por cráteres que el resto de la superficie– el recubrimiento de ésta duraría bastante tiempo.



4. OBERON fotografiado por el *Voyager 2* desde una distancia de 660.000 kilómetros. Algo menor que Titania, el mayor de los satélites de Urano, su antigua superficie, que está densamente poblada de cráteres, muestra pocas señales de actividad geológica. Se ven depósitos oscuros, de origen volcánico quizás, en el fondo de algunos cráteres, en particular en el mayor, cercano al centro de la fotografía; en el mapa del hemisferio Sur de Oberón (*derecha*), este cráter se encuentra entre 30 y 60 grados de longitud, a una latitud de unos 50 grados. El cráter mide más de 100 km de diámetro, y como muchas otras grandes hondonadas del satélite, data del bombardeo por restos heliocéntricos que terminó hace 4000 millones de años.

Según uno de los modelos de la evolución de Titania, el recubrimiento de la superficie se produjo por medio de masivas expulsiones volcánicas de materia sobre la superficie. El vulcanismo comenzó durante la acción del bombardeo heliocéntrico. Grandes cráteres desaparecieron inundados de lava, o simplemente porque la corteza de hielo a su alrededor, que debía estar todavía relativamente caliente y blanda, se derrumbó. A medida que el satélite irradiaba su calor interno, empezó a enfriarse de fuera adentro. Con el tiempo, todo el líquido, principalmente agua, se congeló en su interior. El agua hizo lo que siempre hace cuando se congela a baja presión: se dilató, y ante tamaño volumen de la misma, tuvo que dilatarse la superficie entera del satélite. La corteza se fracturó a lo largo de una red de fallas de expansión, recibiendo éstas bloques de corteza que originarían enormes cubetas. Los movimientos tectónicos pudieron ir acompañados de ulteriores expulsiones de fluidos que construirían llanuras suaves.

Hacia la época en que la mayor parte de la superficie actual se había formado, terminaba también el primer bombardeo. Sobre Titania continuaban lloviendo sólo objetos pequeños, planetocéntricos. Finalmente, limpio ya de residuos el espacio alrededor de Urano, detúvose también el bombardeo. A lo largo de los últimos 3000 millones de años, Titania vivió tranquila, sin mayor perturbación que la ocasio-



nada por el impacto de algún que otro cometa ocasional.

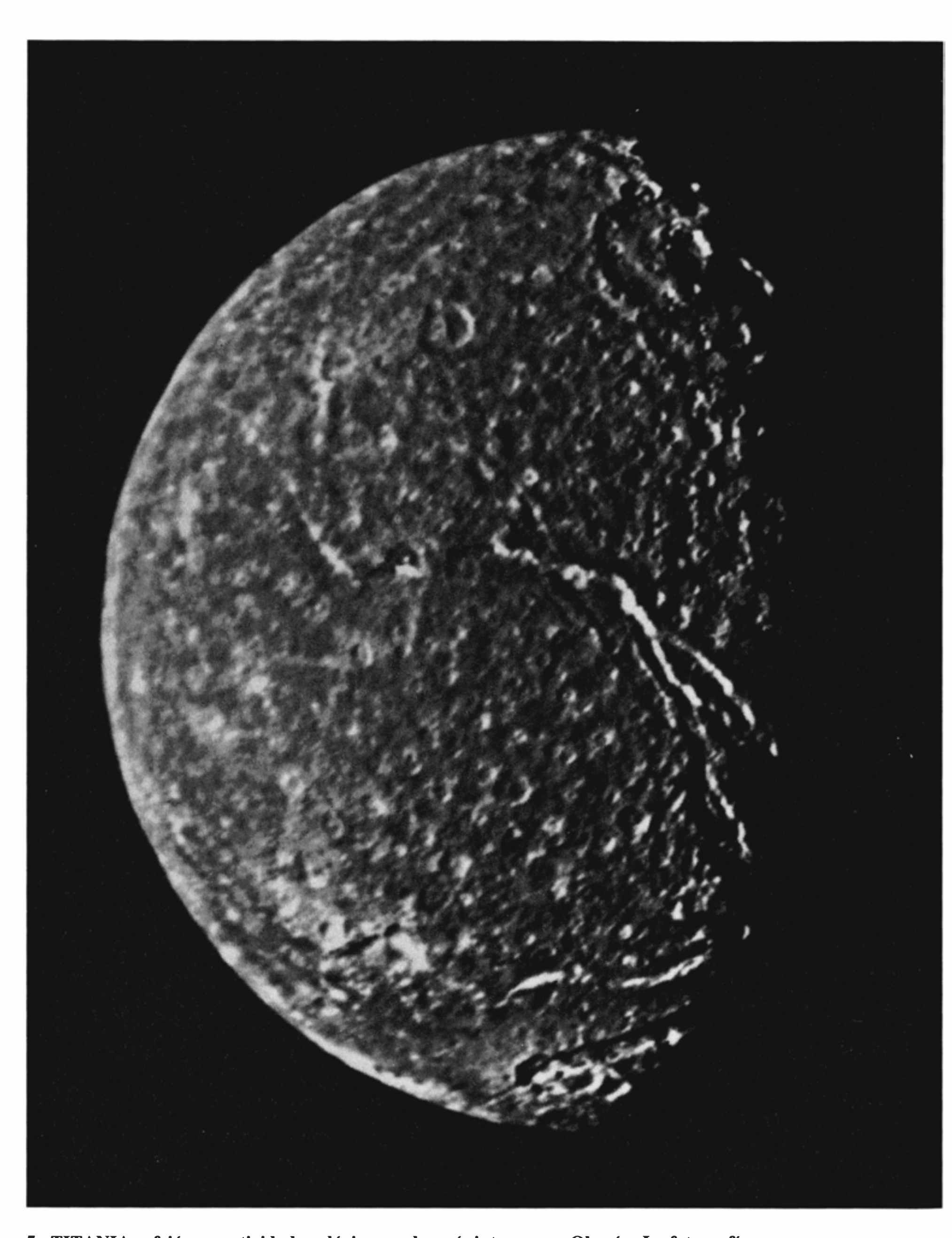
Eugene M. Shoemaker, de la Inspección Geológica de los Estados Unidos, que es un experto en velocidad de formación de cráteres, ha propuesto un tipo más radical de creación de nueva superficie. Sostiene que la primitiva formación de cráteres en Titania producida por objetos heliocéntricos fue intensísima, hasta el extremo de que un nuevo objeto incidente, de suficiente tamaño, más tarde pudo haber partido el satélite. Los trozos desprendidos habrían quedado confinados a la órbita de Titania, para reagruparse en un nuevo satélite bastante pronto. El nuevo satélite tendría una superficie también nueva, sin traza del primitivo bombardeo. Mérito de la hipótesis de Shoemaker es que puede explicar por qué Oberón y Titania presentan propiedades generales análogas, a pesar de su dispar morfología. Tal es la razón: por hallarse más próxima a Urano, cuyo campo gravitatorio debió dirigir y acelerar los residuos incidentes, era más probable la partición de Titania.

Vienen luego Umbriel y Ariel. Ambos constituyen otra pareja interesante. Tienen casi el mismo diámetro (1190 y 1160 kilómetros, respectivamente) y la misma masa, pero el contraste entre ellos es todavía mayor que el contraste entre Oberón y Titania.

Umbriel es notable por su lisura, casi total. Lo mismo que Oberón y Titania, carece de variaciones de brillo a escala global, pero, a diferencia de los otros dos cuerpos, su superficie no está marcada por cráteres con rayos brillantes. (Los rayos brillantes se forman, según se cree, alrededor de los cráteres en satélites helados porque el impacto expulsa hacia la superficie hielo limpio que estaba enterrado.) A medida que el *Voyager 2* se acercaba al sistema uraniano, daba la impresión de que Umbriel podría carecer de cráteres, lo que implicaría que su superficie se estaba regenerando incluso en la actualidad. Sin embargo, las imágenes de alta resolución tomadas en el punto de máxima proximidad revelaron una superficie dominada por grandes cráteres del primer bombardeo; lo único que faltaba eran los rayos.

Es sorprendentemente difícil explicar la uniformidad de Umbriel. Resulta viable la explicación según la cual los micrometeoritos que salpicaron su superficie y mezclaron la materia de los rayos con la subyacente, más oscura, hayan borrado esos rayos brillantes de los cráteres. (El proceso se llama jardinería de impacto.) Cabe una segunda posibilidad: que los rayos contuvieran metano, oscurecido luego por radiación de alta energía. Ambas hipótesis dejan sin aclarar por qué los rayos brillantes están ausentes de Umbriel, pero no de los otros satélites de Urano.

Aunque la explicación más sencilla tal vez sea que nunca se formaron rayos brillantes en Umbriel. Si éste hubiera estado cubierto por una capa de materia oscura de varios kilómetros de espesor, los productos expulsados por un impacto serían oscuros; tales cráteres con rayos oscuros se han observado, por ejemplo, en Ganímedes, un satélite de Júpiter. La capa podría estar formada de una mezcla uniforme y primitiva de hielo y roca. El recubrimiento temprano de Umbriel resulta, al menos, posible, porque Umbriel es más pequeño que Oberón o Titania y, por tanto, cabría esperar que hubiera sufrido menos transformaciones. Además, el hecho de tener la reflectancia

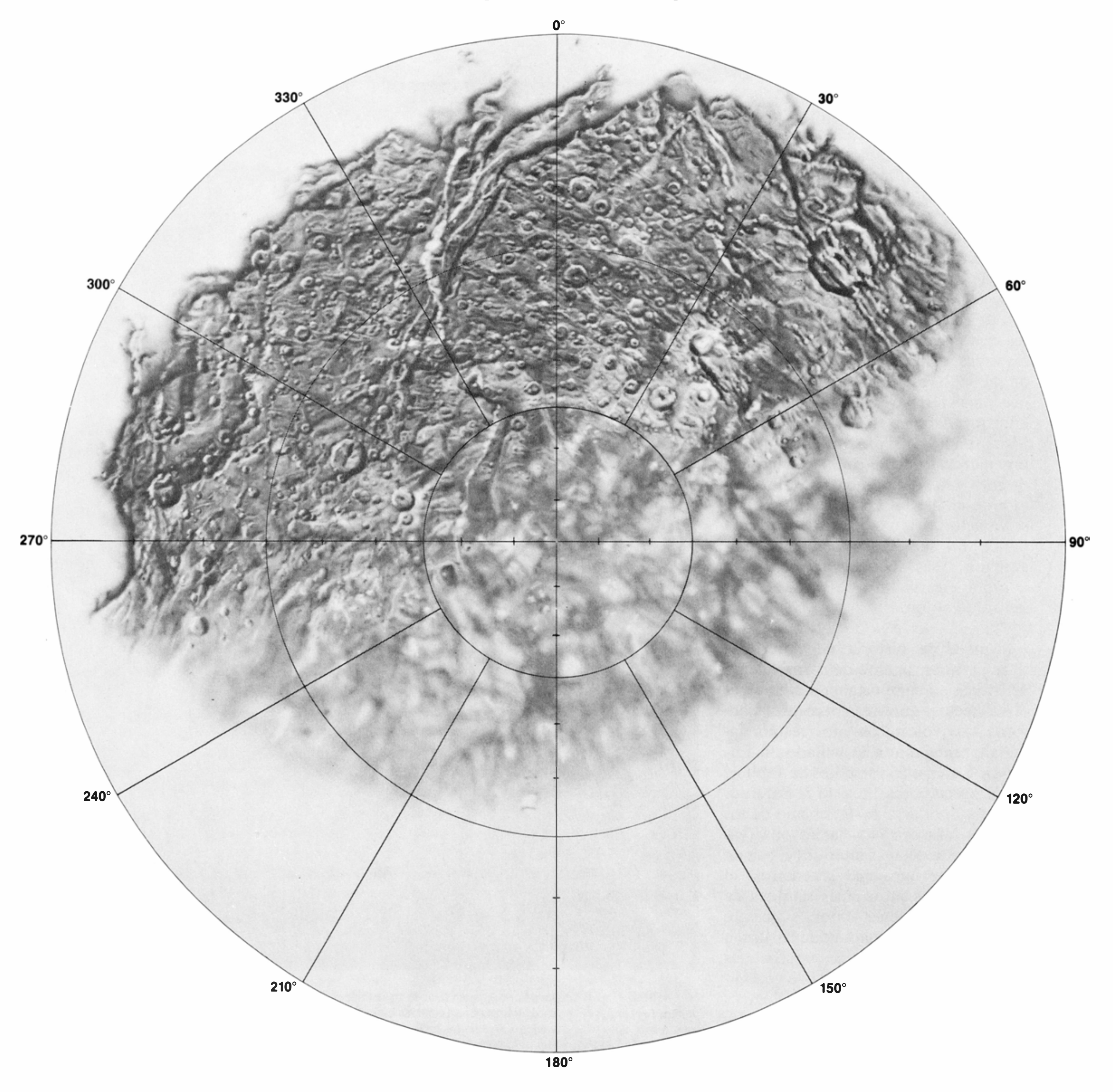


5. TITANIA sufrió una actividad geológica mucho más intensa que Oberón. La fotografía es una composición de dos imágenes obtenidas por la nave desde una distancia de 369.000 km. Titania tiene menos cráteres grandes que Oberón, lo que nos habla de una superficie más reciente; posee una prominente red de fallas de extensión, prueba de que la superficie se ha dilatado. En algunas regiones, por ejemplo, a una longitud de 30 grados (en la parte inferior derecha de la fotografía), la superficie muestra pocos cráteres. Estas regiones lisas pueden haberse formado por expulsión volcánica de una mezcla de hielo y rocas a lo largo de las fallas.

más baja de todos los satélites de Urano (20 por ciento) apoya la idea de que encierra una alta concentración de materia oscura y rica en carbono en su superficie.

Pero ni siquiera esta hipótesis se halla libre de dificultades. Liso en su mayor parte, Umbriel no carece, sin embargo, de accidentes. Antes bien, presenta dos bastante llamativos y brillantes cerca del ecuador: un anillo de 80 kilómetros de diámetro, que parece recubrir el fondo de un cráter de impacto, y una mancha en el pico central de otro gran cráter. El origen de estos accidentes está envuelto en el misterio, por más que el material brillante debió surgir de una zona subyacente a la superficie. Lo que significa que la capa oscura, si existe, sería delgada o inexistente en esas dos zonas, y sólo allí.

Si Umbriel es el más oscuro de los satélites, Ariel es el más brillante, con una reflectancia que se cifra en torno al 40 por ciento. Y mientras que la superficie de Umbriel se encuentra entre las más antiguas y salpicadas de cráteres del sistema uraniano, la de Ariel es una de las más jóvenes y menos craterizadas. La historia de Ariel recuerda la de Titania, con la salvedad de que la actividad geológica en Ariel fue más intensa, extensa y prolongada. Igual que Titania, Ariel apenas si tiene cráteres del bombardeo heliocéntrico. Además, se le ha contado sólo un tercio de los cráteres de bombardeo planetocéntrico descubiertos en Titania,



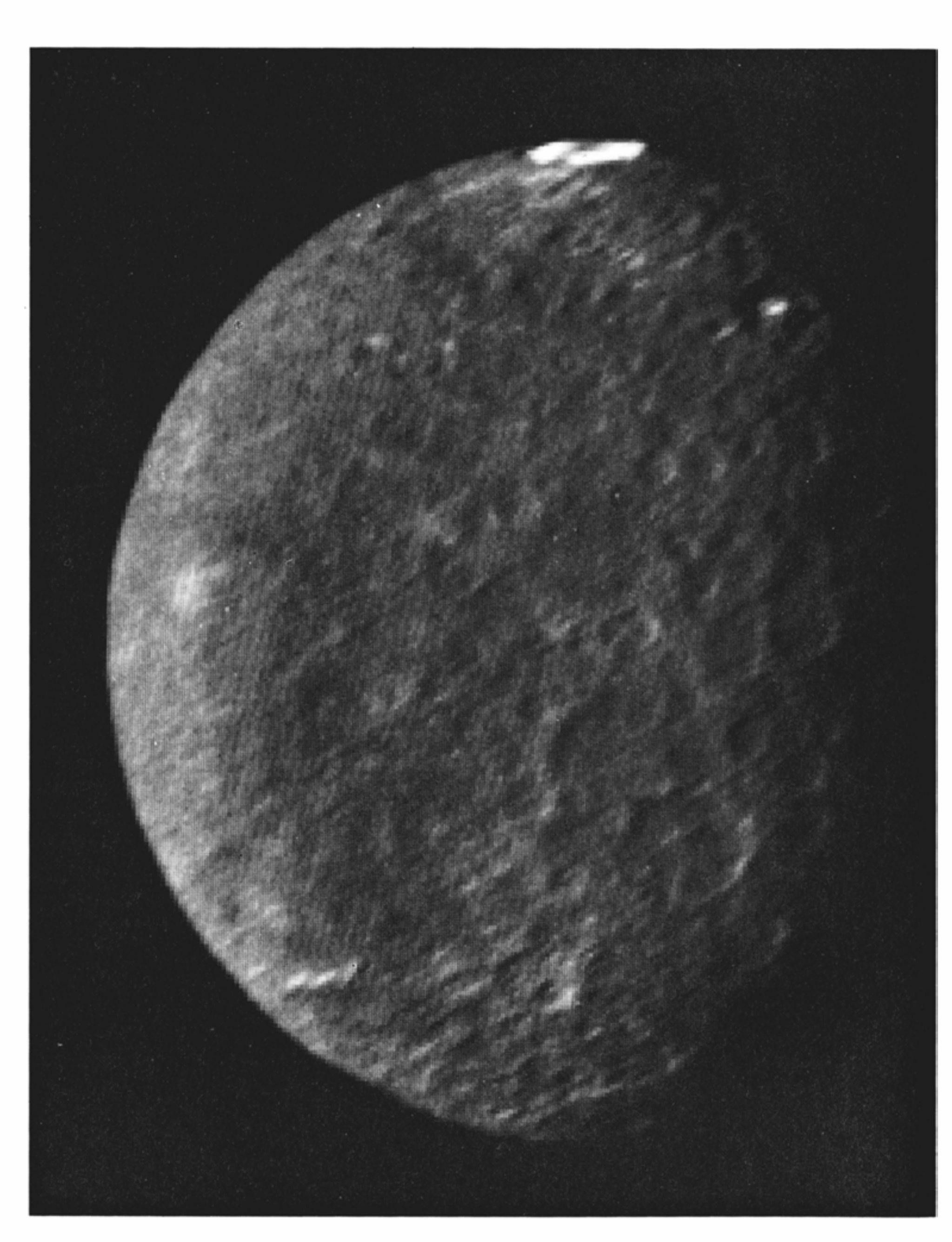
lo que nos habla de una reconstrucción, más prolongada y extensa, de su superficie. Su red global de fallas de dilatación está también más desarrollada; en algunos lugares de Ariel los valles de las fallas alcanzan decenas de kilómetros de profundidad.

La reconstrucción de la superficie de Ariel debióse a un proceso volcánico. Los signos de la expulsión de materia desde el interior sobre la superficie son mucho más concluyentes que en el caso de Titania. Los fondos de los valles de falla del hemisferio que siempre apunta hacia Urano (los satélites de Urano, como la Luna terrestre, describen órbitas sincrónicas) están cubiertos de una superficie lisa y no muy picada de cráteres. Si advertimos que esta capa suave alisa los accidentes geológicos anteriores –el ejemplo más espectacular es un gran cráter a medio enterrar–, concluiremos que la produjeron ríos volcánicos.

En algunos sitios, la capa lisa presenta surcos y crestas paralelos a los ejes de los valles de falla. Esa morfología sugiere que la materia brotó a través de fracturas sufridas a lo largo de los ejes y se extendió sobre el fondo de los valles, a imagen de la lava que mana de hendiduras abiertas en el fondo oceánico terrestre. El material que afloró en Ariel no era, casi con certeza, roca fundida, sino, probablemente, una mezcla bastante caliente y plástica de roca y hielo que fluyó cual si se tratara de un glaciar terrestre. La mezcla se caracterizaría por su viscosidad: allí donde ha sepultado accidentes más antiguos, sus bordes forman una abrupta escarpadura de casi un kilómetro de altura.

Aunque la historia de Ariel nos pinte un satélite de sorprendente actividad, su comportamiento en algunos aspectos –grietas en la corteza y helados ríos volcánicos– nos resulta familiar, semejante a lo hallado en Europa y Ganímedes, satélites de Júpiter, y en Encélado, satélite éste de Saturno. Miranda, por otra parte, es uno de los mundos más extraños jamás observados. Se trata del más interior (y, con un diámetro de unos 500 kilómetros, el menor) de los principales satélites de Urano, que apenas tiene suficiente fuerza gravitatoria para adquirir forma esférica. Sin embargo, su superficie es una amalgama desordenada de complicados y exóticos relieves geológicos que parecerían más propios de un planeta de tamaño diez veces mayor.

La unidad geológica más antigua de Miranda está formada por llanuras onduladas, densamente picadas de cráteres provocados por bombardeo planetocéntrico. Cubren la mayor parte de la superficie visible en las imágenes del *Voyager* y no parecen particularmente extrañas. Sin embargo, superpuestas a las llanuras onduladas, hay tres regiones inmensas, entre ovales y trapezoidales, que, a falta de palabra mejor, llamamos ovoides. Tienen entre 200 y 300 kilómetros de diámetro y, a juzgar por el número de cráteres, son bastante más jóvenes que las llanuras. Están formados por cinturones localmente paralelos de crestas, surcos y escarpaduras que se cortan en ángulos extraños. A lo largo de las escarpaduras y en los cráteres recientes interiores a los ovoides, se distingue materia oscura y materia brillante; en cambio, las llanuras onduladas manifiestan una reflectancia bastante uniforme. Finalmente, tanto los ovoides como las llanuras están cortadas por grandes zonas de fractura que envuelven Miranda, creando valles de

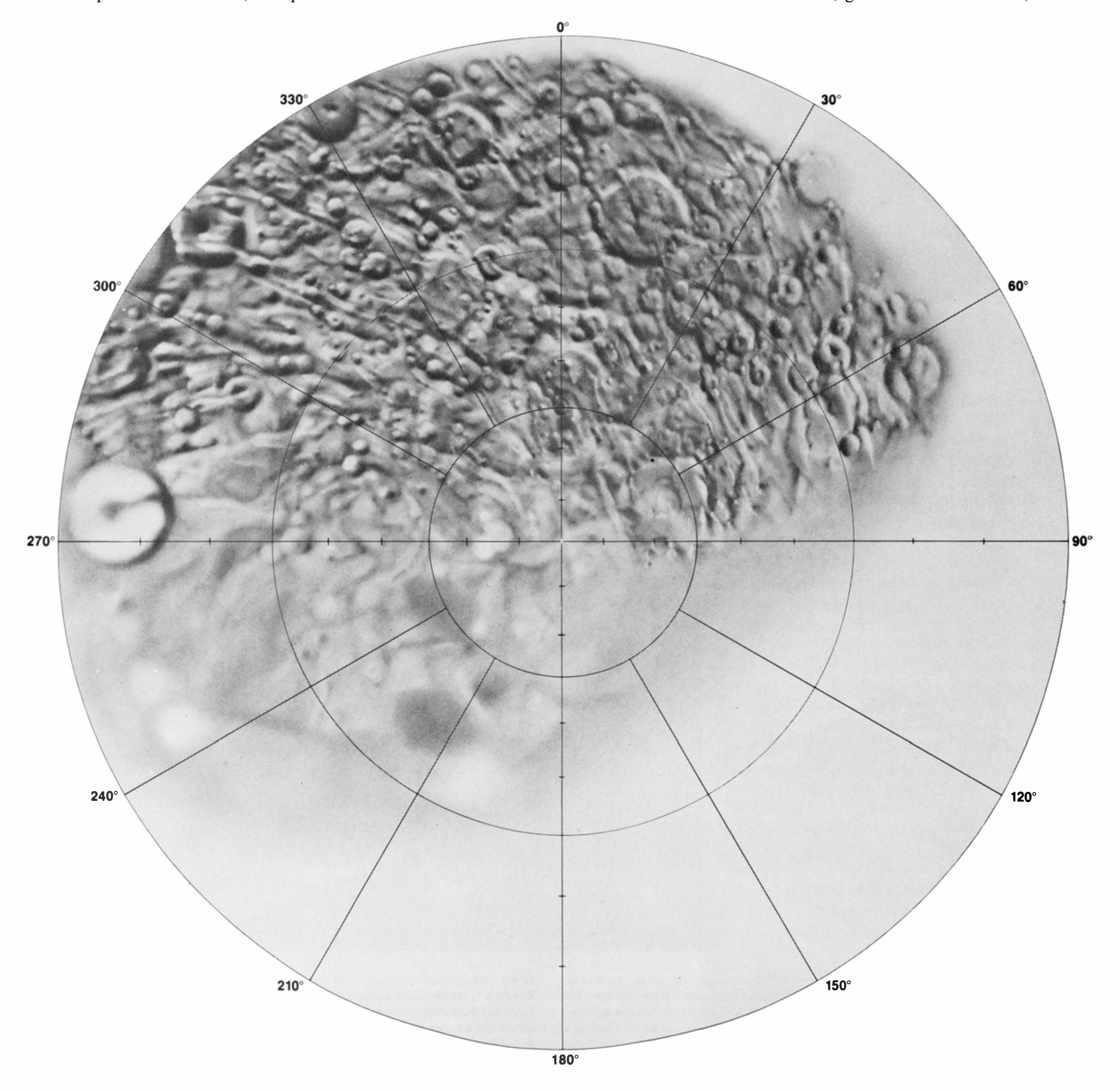


6. UMBRIEL se distingue por su aspecto liso: su superficie es de un gris oscuro y casi uniforme. La abundancia de grandes cráteres evidencia su antigüedad. En la fotografía, obtenida desde una distancia de 557.000 kilómetros, sólo se destacan dos accidentes brillantes cerca del ecuador. El primero es un anillo reluciente a una longitud de 270 grados de longitud; el anillo parece descansar en un cráter de 80 kilómetros de diámetro. El segundo accidente es un punto brillante en el pico central de otro cráter, sito a unos 310 grados.

fractura cuyos acantilados, en terraza, alcanzan alturas de hasta 10 a 20 kilómetros.

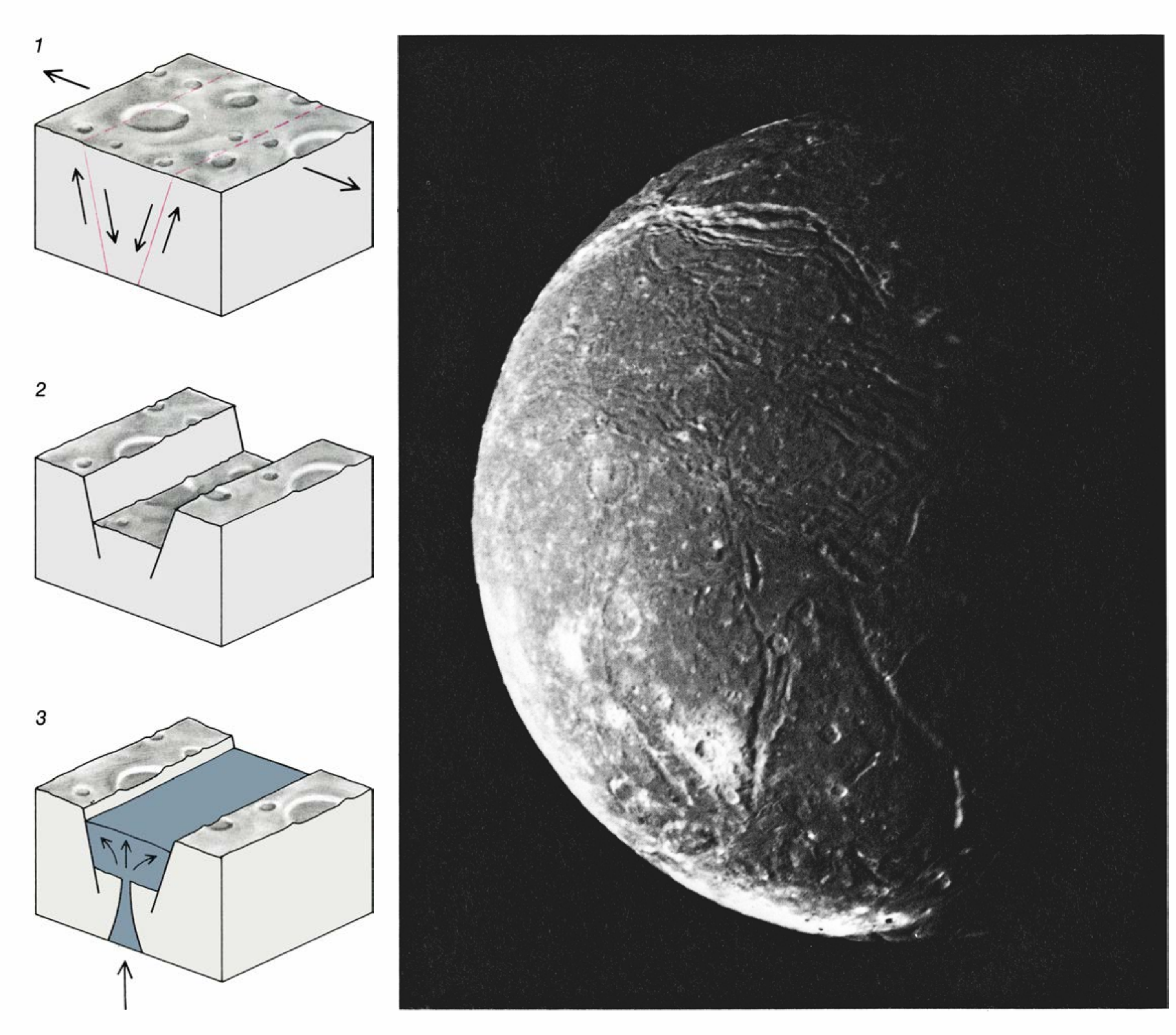
La materia de los ovoides podría ser muy bien menos densa que la observada en las llanuras. Las zonas brillantes a lo largo de las escarpaduras podrían ser de hielo limpio subyacente a la superficie, mientras que la materia oscura se parecería, probablemente, a la que brotó de los cráteres de Oberón. Hay algunos indicios de corrientes eruptivas en Miranda, aunque no tan numerosas como en Ariel. En uno de los ovoides, la materia parece haber salido de un cono bajo en forma de herradura, sepultando declives y crestas y acumulándose detrás de un frente de flujo abrupto y lobuliforme.

Los dos modelos que se han elaborado para explicar las rarezas de Miranda otorgan a los ovoides, por diferentes razones, menor densidad que a las llanuras onduladas. El primer modelo se basa en las ideas de Shoemaker acerca de la velocidad inicial de formación de cráteres. Shoemaker cree que Miranda se partió en pedazos, como lo hizo Titania, aunque cinco o más veces en lugar de una. Pero siempre se recompuso. Antes del último cataclismo, según la teoría, la roca y el hielo del satélite tuvieron tiempo de separarse parcialmente. De aquí que, cuando Miranda se partió de nuevo, lo hizo en grandes pedazos, compuestos principalmente de roca o hielo. Cuando los pedazos se reunieron de nuevo al azar, grandes trozos de roca,



que habían estado cerca del núcleo de la antigua Miranda, quedaron inmersos en la superficie del nuevo conglomerado. El nuevo satélite retuvo suficiente calor interno para permitir el flujo viscoso en su interior. En consecuencia, las masas de roca comenzaron a hundirse hacia el centro nuevamente, dejando que el hielo, más ligero, ascendiera y fluyera en el espacio libre, y agrietando la superficie a lo largo de líneas de fractura concéntricas. Los ovoides, según este punto de vista, constituyen perturbaciones superficiales que quedaron tras el hundimiento de las masas de roca.

Contra esta teoría se objeta la dificultad de explicar cómo lograron tamaños bloques de roca quedar intactos en medio del cuarteamiento general y la reagrupación del satélite. Más probable parece que el cataclismo hubiera producido fragmentos menores. Otro punto de vista, propuesto por uno de los autores (Soderblom), sostiene que, cuando Miranda se recompuso por última vez (aquí no importa saber si se partió o no), era una mezcla bastante uniforme de hielo y roca. Después, en virtud de su calor interno, inició su transformación. Conforme la roca se fue hundiendo hacia el centro, los aglomerados de hielo comenzaron a ascender hacia la superficie. Según esta hipótesis, los ovoides no nacieron de grandes masas de roca que se hundían, sino de parejas masas de hielo que ascendían; éstas, con el tiempo, cuartearían la superficie. La forma de los ovoi-

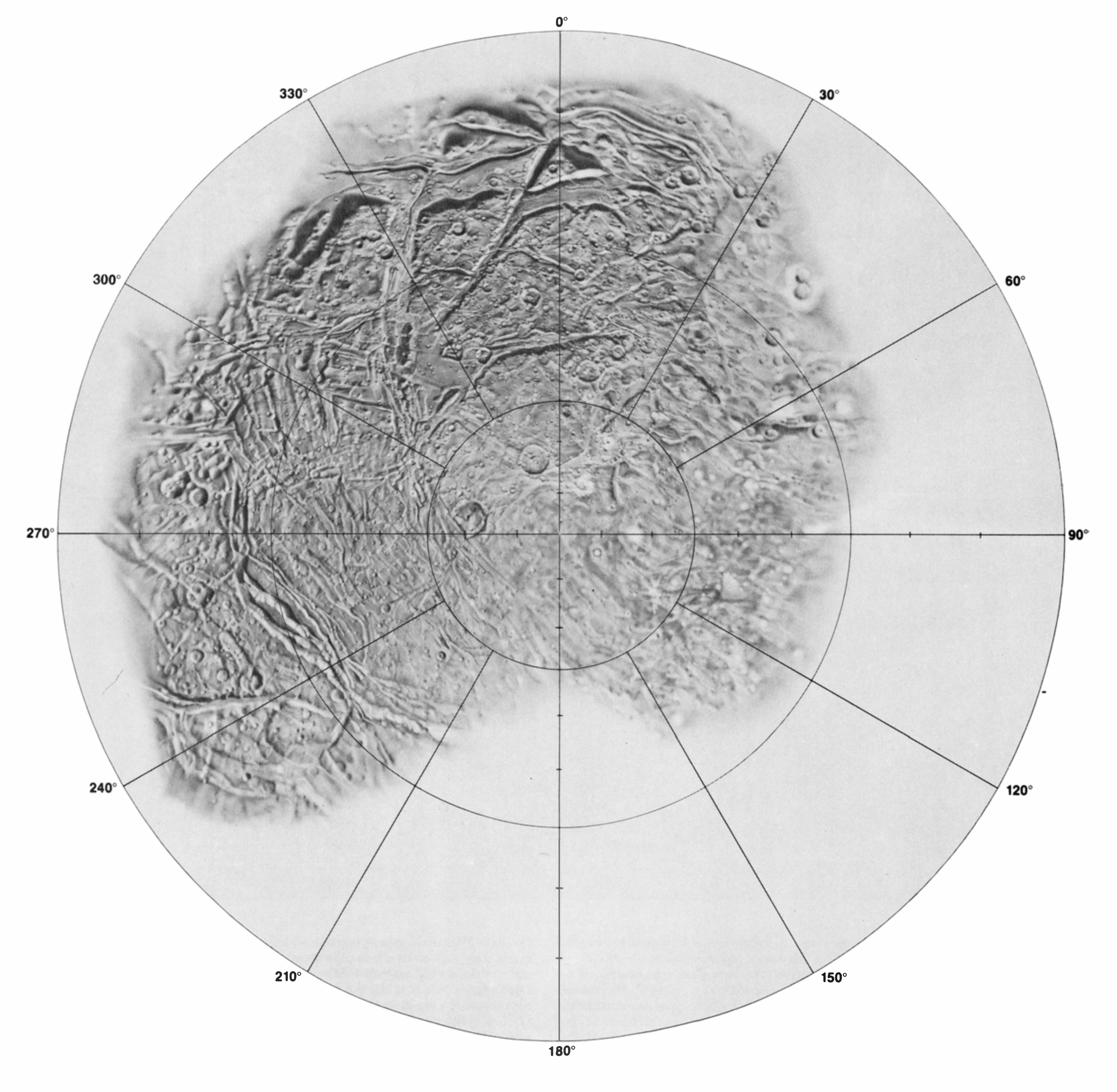


7. ARIEL es el satélite de Urano que nos ofrece el mayor cúmulo de pruebas de actividad volcánica. La fotografía constituye un mosaico de imágenes obtenidas desde una distancia de unos 130.000 kilómetros. Los accidentes más prominentes son las amplias artesas entrecruzadas, o valles de falla, situadas a lo largo del ecuador (a la derecha de la fotografía). Las artesas están rellenas de materia lisa, escasamente poblada de cráteres, que fue expulsada a lo largo de los ejes de los valles y fluyó sobre el fondo de éstos. El proceso, común en la Tierra, se ilustra a la izquierda. La dilatación de la corteza fuerza la rotura de ésta a lo largo de las fallas de extensión (*1*); a continuación, un bloque de corteza se hunde, formando una artesa (*2*); por último, la materia parcialmente fundida del interior del satélite asciende rellenando la artesa (*3*). Buena parte de la superficie de Ariel se recubrió de nueva materia tras el bombardeo heliocéntrico.

des (son todos del mismo tamaño aproximado y se disponen a intervalos regulares) sugiere una organización interna de las corrientes, tal vez alguna forma de células de convección.

Al parecer, el proceso de transformación de Miranda quedó inconcluso. Si la transformación hubiera continuado, los ovoides quizá se habrían borrado y Miranda habría quedado cubierta por una capa de hielo sólido que rodearía a un núcleo de roca, asimismo sólida. Pero ocurrió que el satélite quedó congelado en una fase embrionaria de su desarrollo geológico. Aunque algunos investigadores creen que los ovoides no tendrían más allá de mil millones de años de edad, nos inclinamos a pensar que la evolución de Miranda se detuvo hace entre 3000 y 4000 millones de años.

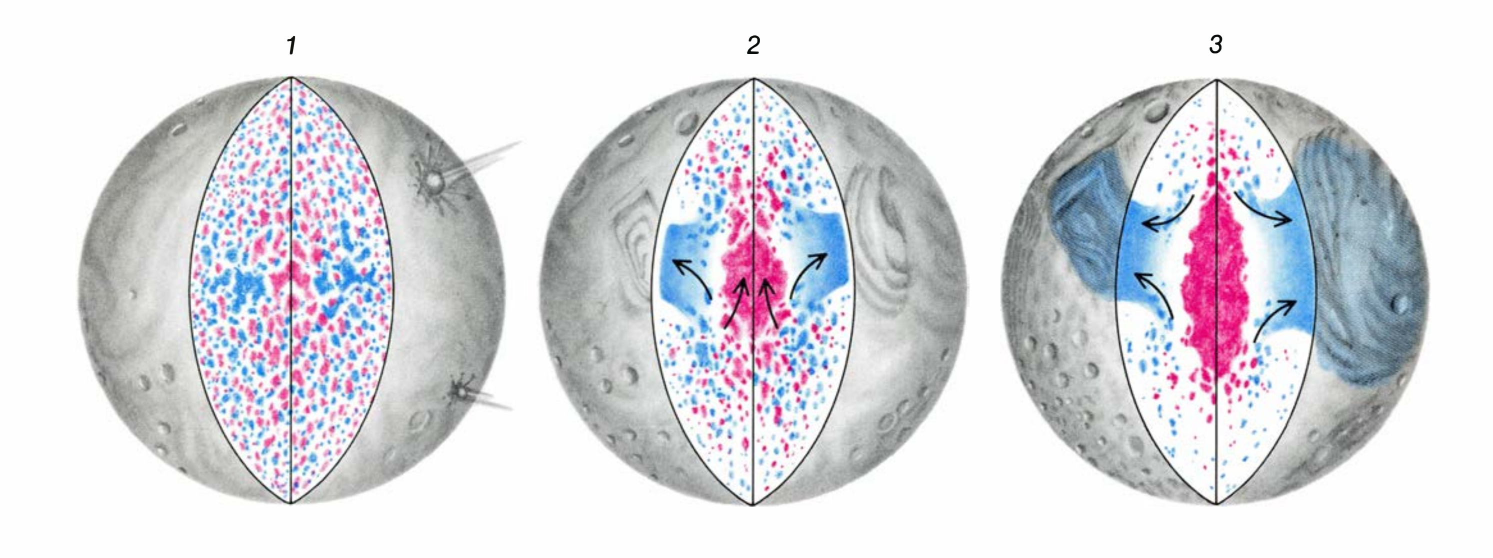
De Ariel y Miranda no extraña tanto que su actividad geológica se suspendiera hace mucho tiempo cuanto que llegara siquiera a iniciarse. Tal grado de actividad en objetos tan pequeños –Ariel es una tercera parte, y Miranda menos de una sexta parte, del tamaño de nuestra Luna– habría parecido desconcertante diez años atrás. Se creía entonces que la fuente principal del calor interno de un cuerpo planetario sólido era la desintegración gradual de elementos radiactivos de larga vida, como el uranio, el potasio y el torio. Por ser proporcional la cantidad de elementos radiactivos en un cuerpo planetario a su volumen, mientras que

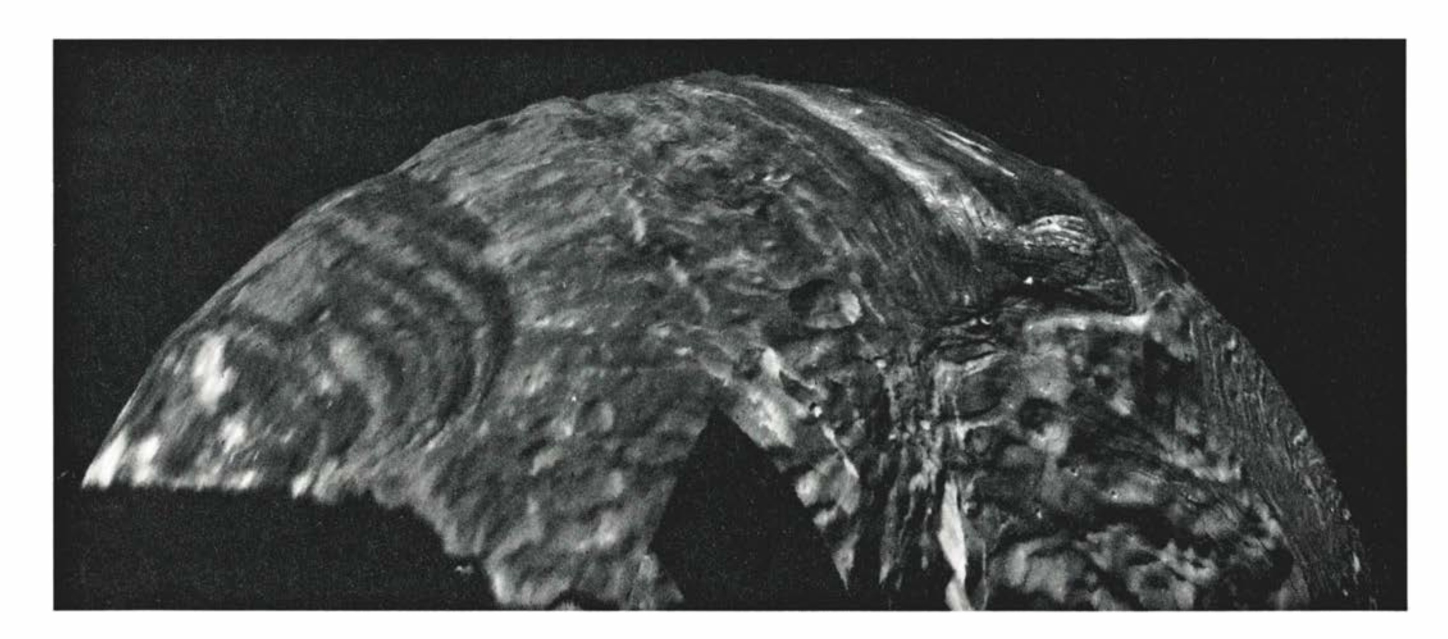


la velocidad de pérdida de calor es proporcional al área de su superficie, un cuerpo grande retiene el calor interno durante mucho más tiempo que otro pequeño y, por tanto, experimenta un desarrollo geológico más prolongado. Los planetas terrestres siguen esta regla. La Tierra, el mayor, se ha mostrado el más activo desde un punto de vista geológico; Marte, de tamaño intermedio, ha tenido un nivel más bajo de actividad volcánica a lo largo de su historia; Mercurio y la Luna son pequeños y han conocido sólo una temprana evolución, muy breve además.

Los satélites de los planetas del Sistema Solar exterior no cumplen esa regla. Durante los últimos 10 años, las observaciones obtenidas por los *Voyager* de más de 20 de tales satélites han obligado a replantear de raíz el punto de vista clásico acerca de la historia geológica de los cuerpos pequeños. El satélite Io de Júpiter, cuyos volcanes están todavía en erupción, es el contraejemplo más espectacular; varios satélites más de Júpiter y Saturno muestran también señales de actividad geológica importante. A esa lista cabe añadir Miranda, Ariel y, tal vez, Titania.

La trascendencia de las observaciones del *Voyager* no se ha evaluado todavía, pero han comenzado ya a abrirse paso algunas ideas básicas. Los satélites deben tener otra fuente de energía además de la desintegración de cuerpos radiactivos. Tal vez recibieran una temprana ola de calor provocada





8. MIRANDA se nos ofrece aquí bajo un ángulo que el *Voyager 2* nunca vio. Como el vehículo espacial pasó muy cercano a Miranda (menos de 29.000 kilómetros), la escala de sus abruptos accidentes topográficos se podía deducir de tomas estereoscópicas de la misma región desde diferentes ángulos. Miranda es el único satélite del Sistema Solar exterior del que disponemos de información topográfica detallada. Usando estos datos, los investigadores del Servicio Geológico de los Estados Unidos han reproyectado las imágenes del *Voyager* desde nuevos ángulos para así destacar diversos accidentes de la sorprendente morfología de Miranda. Las imágenes reprocesadas apoyan la teoría de que el satélite quedó congelado en un estado embrionario de transformación. De acuerdo con este modelo, el satélite uraniano Miranda tuvo en su temprana historia suficiente calor interno para permitir que su hielo y rocas formasen algomerados (*1*). La roca comenzó a hundirse hacia el núcleo y el hielo ascendió hacia la superficie (*2*). Con el tiempo, grandes penachos de hielo irrumpieron en la superficie del satélite formando las configuraciones ovoidales (*3*). El calor de Miranda se fue agotando antes de que pudiera darse por terminado el proceso de diferenciación.

por isótopos de corta vida: iodo 129 o aluminio 26, presentes ambos, según se cree, en la primitiva nebulosa solar. Otra posible fuente de calentamiento temprano es la energía gravitatoria liberada por los residuos incidentes que se acumulaban sobre los satélites.

Las marcas de resonancia se ofrecen como una tercera fuente de calentamiento, potencialmente más prolongada. Cuando los períodos orbitales de dos satélites adyacentes difieren en un factor entero, un satélite perturba la órbita del otro a intervalos regulares que son múltiplos del período del satélite perturbado. El efecto es análogo al que se produce al impulsar un péndulo a su frecuencia de resonancia: la amplitud de la perturbación crece espectacularmente. Como resultado, la órbita del satélite perturbado deja de ser circular para convertirse en elíptica. En razón de la elipticidad, el abombamiento creado por la marea gravitatoria del planeta en la superficie del satélite tiende a fluctuar hacia arriba y hacia abajo, hacia delante y atrás. El abultamiento móvil puede inyectar en el cuerpo una enorme cantidad de energía de rozamiento, energía que debe disiparse en forma de calor. Se cree que el calentamiento provocado por las mareas es el responsable de la actividad geológica en Io, Europa y Encélado.

Los satélites de Urano no están ahora en resonancia. Steven W. Squyres, Ray T. Reynolds y Jack Lissauer, del Centro de Investigación Ames de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), indicaron, sin embargo, en un artículo publicado antes del paso del *Voyager*, que Miranda, Ariel y Umbriel podrían haber atravesado un período de resonancia en un pasado geológicamente reciente. En el momento actual, el calor instado por las mareas parece la fuente más probable que justificara la intensa actividad geológica en Miranda y Ariel. El efecto de marea en Umbriel sería menos importante por hallarse más alejado de Urano; ello podría explicar la razón de que Umbriel y Ariel se desarrollaran de maneras tan diferentes, a pesar de su tamaño parejo.

La inesperada actividad en los satélites del Sistema Solar exterior debe también tener algo que ver con su composición. Para producir ríos volcánicos, por ejemplo, un satélite ha de contar no sólo con una fuente interna de calor, sino que también debe estar constituido de materia que, al menos parcialmente, pueda fundirse. Los modelos de la química de la primitiva nebulosa solar indican que los satélites del Sistema Solar exterior serían mezclas de rocas carbonáceas y hielos, hielo de agua sobre todo. La temperatura en la superficie de los satélites de Urano está en la vecindad de los 80 grados Kelvin (−193 grados Celsius); el hielo de agua se funde a 273 grados Kelvin. Cualquiera que fuese la fuente de calor de los satélites, los cálculos teóricos sugieren que la temperatura interna de cuerpos tan pequeños no llegó a alcanzar siquiera 200 grados por encima de la temperatura en superficie.

Los satélites contienen probablemente materia que se funde antes que el hielo de agua. Los candidatos principales parecen ser el hidrato amónico, el clatrato de metano (una forma de hielo de agua en la que hay moléculas de metano intercaladas en el retículo cristalino del hielo) y clatrato de monóxido de carbono. La mezcla saturada de amoníaco y agua, por ejemplo, cifra su punto de congelación unos 100 grados por debajo del característico del agua pura.

Las proporciones relativas de hielo y roca en un satélite influyen también en su propensión a la actividad geológica. Cuanta más roca albergue, mayor será su fuente de calor radiogénica, por la sencilla razón de que los elementos radiactivos se hallan interpuestos en la roca. Para estimar la cantidad de roca de un satélite se debe conocer su densidad media; para averiguar ésta, hemos de saber con cierta precisión cuál es su masa. Las estimaciones de las masas de los satélites de Urano anteriores al paso del *Voyager 2* resultaron erróneas; el vehículo espacial sí midió las masas de Oberón y Titania con exactitud. (Merece la pena detenerse en el método de medición seguido. Durante las semanas anteriores al encuentro, los satélites fueron fotografiados continuamente, porque necesitábamos saber sus posiciones exactas para gobernar la nave. Las fotografías revelaron los débiles efectos perturbadores de cada satélite sobre la órbita del otro. Estas perturbaciones, junto con el seguimiento preciso por radio del vehículo, permitieron a los investigadores calcular las masas de los satélites.)

Cuando las masas medidas se convierten en densidades, y se han tenido en cuenta los efectos de la propia autocompresión gravitatoria, Oberón y Titania se nos manifiestan compuestos de materiales cuya densidad media está entre 1,4 y 1,7 gramos por centímetro cúbico. Estas cifras implican que los dos satélites son de roca, entre un 40 y un 65 por ciento; aparecen así bastante más rocosos que Japeto y Rhea, dos satélites de Saturno de tamaño equiparable. Los otros satélites de Urano pueden tener fracciones de roca igualmente altas. (No podemos afirmarlo con absoluta seguridad porque la incertidumbre acerca de sus masas es todavía demasiado grande.) Esto sugiere que el calor radiogénico pudo haber aportado una importante contribución a su actividad geológica.

El carácter rocoso de los satélites de Urano, comparado con los de Saturno, contradice lo imaginado por la intuición: uno esperaría encontrar más hielo, y no menos, a medida que nos alejamos del Sol. Algunos modelos de la nebulosa solar habían predicho que los satélites de Urano no tendrían más de un 35 por ciento de roca. Por lo que se ve, andaban equivocados.

Se han propuesto varias revisiones de los modelos. De acuerdo con una de ellas, las reacciones químicas que prevalecían en las frías regiones exteriores de la nebulosa solar difirieron de las dominantes en las regiones interiores. Otra posibilidad es la sugerida por James B. Pollack, del Centro de Investigación Ames: los satélites de Urano obtuvieron su proporción rocosa de una envoltura gaseosa ligada a Urano, y no de la nebulosa solar. David J. Stevenson, del Instituto de Tecnología de California, sostiene que el mismo suceso que se cree ha dado a Urano su insólita orientación pudo haber creado una envoltura rica en materia rocosa: el impacto, durante la fase final de la acumulación de materia en el planeta, de un cuerpo del tamaño aproximado de la Tierra. Los satélites se destruyeron probablemente en tal suceso, de modo que se formarían después. En el proceso, incorporarían rocas del cuerpo que chocó o del propio planeta.

Las imágenes del *Voyager* han aportado cuantiosa información acerca de los satélites de Urano. Pero no revelaron de entrada y llanamente por qué son como son: por qué son oscuros y rocosos y presentan diversa geología. Cierto es que tampoco se esperaba que lo hicieran. Estos problemas mantendrán ocupados a los investigadores teóricos durante algún tiempo. En cuanto a los autores, están ya apuntando a Neptuno, al gran satélite de Neptuno, Tritón, y al próximo encuentro, breve e intenso, del *Voyager 2*, en 1989, con otro mundo.

Ciencia y sociedad

Termohidráulica de reactores nucleares en España

Existen múltiples antecedentes internacionales de la investigación termohidráulica en análisis de accidentes de reactores nucleares. El más significativo, sin duda, es el Programa Experimental LOFT desarrollado en Estados Unidos por iniciativa del organismo regulador en materia de seguridad nuclear (USNRC).

La instalación LOFT, ubicada en el laboratorio nacional de Idaho, es la reproducción a escala de un reactor nuclear comercial de agua a presión del tipo Westinghouse. Dispone de un núcleo de 50 megawatt térmicos de potencia y está diseñado en configuración modular; con un conjunto de líneas auxiliares, permite, pues, el ensayo de múltiples accidentes para comprobar la correcta actuación de los equipos de seguridad o para estudiar métodos alternativos de mitigación en caso de que estos equipos fallen.

Se han realizado treinta y seis experimentos termohidráulicos financiados por el Departamento de Energía (1976-1982) y ocho en el marco OCDE-LOFT (1983-1985). Los seis primeros experimentos de la serie OCDE-LOFT son de tipo termohidráulico: LP-02-6 y LP-LB-1 plantean una rotura del 100 por ciento en la rama fría en función de la normativa norteamericana e inglesa respectivamente; LP-SB-1 y LP-SB-2 se crearon tras el accidente de Three Miles Island y estudian la influencia de la operación o parada de las bombas del primario en caso de rotura pequeña en la rama caliente; LP-SB-3 aborda una rotura pequeña en la rama fría sin la actuación activa del sistema de refrigeración de emergencia; por fin, LP-FW-1 ensaya la pérdida de foco frío de la central al suspender el aporte de agua al generador de vapor.

Los experimentos termohidráulicos tenían por objeto poner de manifiesto los fenómenos asociados a accidentes verosímiles, que son la base del diseño de los sistemas de seguridad frente a emergencias.

Los dos experimentos en que se infligía un daño severo al núcleo (LP-FP-1 y 2) se reservaron para el final, coincidiendo con los planes de desmantelamiento de la instalación. Se ha podido así investigar los fenómenos que conducen a la liberación de los productos de fisión del combustible al refrigerante y su posterior difusión y transporte.

En la historia del uso pacífico de la energía nuclear destacan dos hitos: el accidente de Three Miles Island y el de Chernobyl. Su consecuencia inmediata no ha sido la paralización del programa nuclear, sino el impulso de programas de investigación y desarrollo relacionados con la seguridad.



Central Nuclear José Cabrera

La participación española en el Programa de Investigación LOFT tomó cuerpo con la firma, el seis de noviembre de 1984, del Convenio OCDE-LOFT-España entre el Consejo de Seguridad Nuclear, la Empresa Nacional del Uranio, S.A., el sector eléctrico, representado por su patronal UNESA, la Junta de Energía Nuclear y la Universidad Politécnica de Madrid. Desde entonces, varios técnicos se han desplazado a la propia instalación LOFT o a centros de investigación y desarrollo asociados al proyecto internacional. Por otra parte, los grupos de cálculo españoles han dispuesto de los resultados de los diversos experimentos, de programas de cálculo muy refinados y de acceso a ordenadores de gran capacidad, que han constituido la base de trabajo en la etapa de evaluación post-experimental. Se ha alcanzado un acuerdo muy satisfactorio entre las medidas experimentales y la predicción de los cálculos.

En lo que se refiere al ámbito de los programas de cálculo termohidráulico existen dos grandes líneas de trabajo: el programa TRAC (del Laboratorio Nacional de los Alamos), pensado para el análisis termohidráulico de accidentes con grandes roturas en el circuito de refrigeración del reactor, y el programa RELAP (del Laboratorio Nacional del Idaho), que cubre los accidentes con pequeñas roturas en el mismo circuito, la rotura de tubos del generador de vapor, la rotura de la línea de vapor, los accidentes sin la actuación del sistema de protección del reactor, transitorios operacionales y otros.

Los fenómenos termohidráulicos inherentes al primer caso exigen un tratamiento tridimensional del problema, en tanto que en el caso segundo es suficiente la aproximación monodimensional. La flexibilidad de uso y aplicación de RELAP le han convertido en una herramienta de cálculo idónea para la mayor parte de los estudios de seguridad de reactores de agua ligera a presión; y lo están empleando organismos reguladores, diseñadores de combustible y de sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo y grupos de apoyo a la explotación de centrales nucleares de potencia para evaluar transitorios operacionales, revisar los procedimientos de operación normal y de emergencia y realizar estudios paramétricos que identifiquen la sensibilidad de una planta a un conjunto de condiciones de contorno de la forma más realista posible.

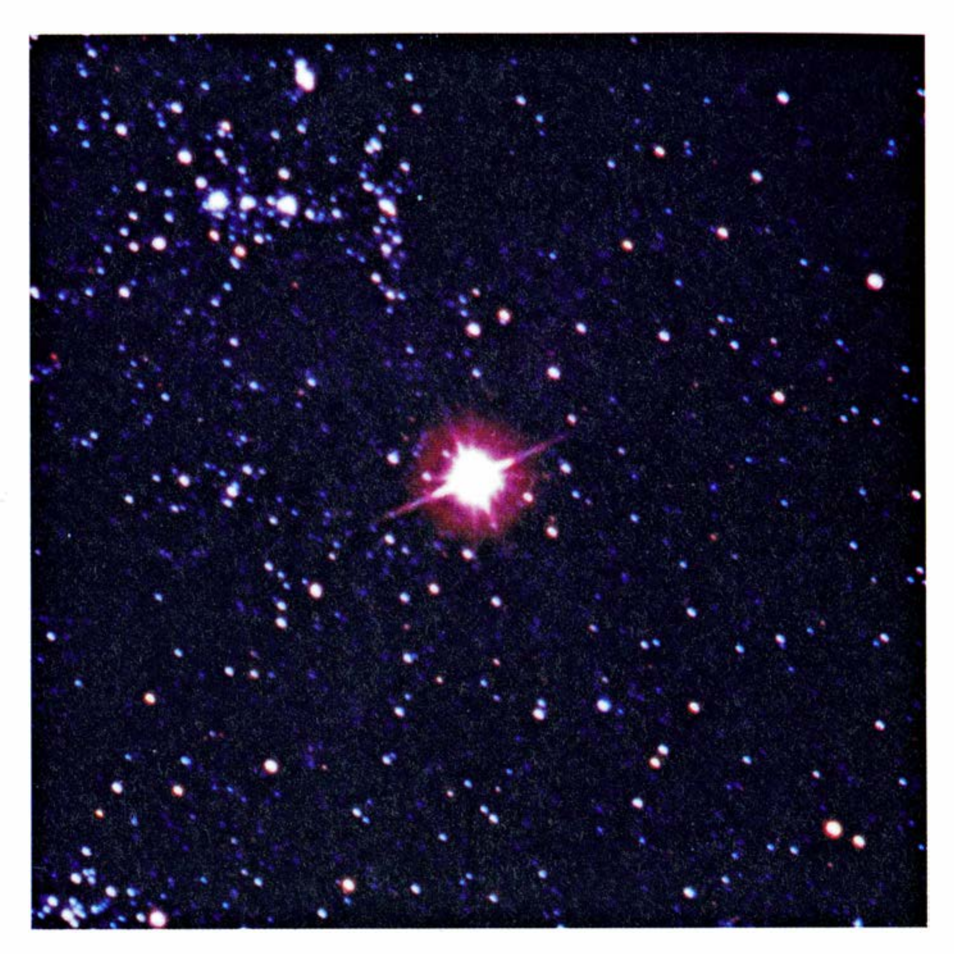
El programa RELAP5 está basado en un modelo bifásico (agua-vapor) con ecuaciones de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento para

cada fase, considerando el fluido en desequilibrio termodinámico, pudiendo contener sustancias incondensables (aire, nitrógeno, helio, etcétera) y no volátiles disueltos en el refrigerante (boro). La resolución numérica dispone de un método parcialmente implícito para accidentes transitorios severos y otro totalmente implícito para cálculos de estado estacionario y transitorios suaves, con objeto de poder optimizar económicamente el tiempo de cálculo. Es aplicable a procesos termohidráulicos bifásicos en general (centrales térmicas) y para ello dispone de modelos de tuberías, ramas, bombas, válvulas, turbinas, separadores de humedad, superfícies calefactoras, estructuras de transferencia térmica y sistemas de control. Existen además modelos especiales, como son los de acumuladores, conductancia del huelgo y de cinética puntual, que permiten su aplicación a los reactores nucleares.

Muchas de las mejoras de ambos programas de cálculo han sido consecuencia de los resultados experimentales del plan de investigación en termohidráulica. Una vez concluida la etapa de investigación experimental en LOFT y con las últimas versiones de los programas de cálculo desarrollados, TRAC y RELAP5-MOD2, se requiere un período de aplicación de estas herramientas de cálculo que posibilite su utilización con otras instalaciones experimentales y centrales de potencia. Así surge el programa de validación ICAP, para aplicar estos programas de cálculo al conjunto más variado posible de instalaciones nucleares.

España es uno de los países miembros de este programa de trabajo y su contribución se centrará principalmente en la simulación de pruebas nucleares de puesta en marcha de centrales nucleares españolas en operación, así como en el análisis de los transitorios más significativos que su explotación haya originado.

El hecho de haber participado en LOFT y de disponer de una infraestructura de investigación en termohidráulica permite abordar de forma inmediata estas tareas. Pero ni la integración española en LOFT ni la participación en el programa de validación ICAP y cuantos planes de investigación y desarrollo en termohidráulica emprenda nuestra nación son fines en sí mismos, sino medios para optimizar la seguridad operativa de nuestras centrales nucleares mediante el uso óptimo de las herramientas de cálculo disponibles. A este respecto cabe mencionar que existen varios proyectos en curso de análisis de transitorios y accidentes postulables con RELAP y 5/MOD 2, para las centrales nucleares de Almaraz, Trillo y José Cabrera. (Luis Rebollo.)



1. SUPERNOVA 1987A, que luce como una estrella de magnitud 4,5 en esta fotografía tomada en el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, Chile

¡Supernova!

En el estudio de las supernovas, la dialéctica entre teoría y observación se ha decantado en favor de la teoría. Esos cataclismos estelares alcanzan el brillo de galaxias enteras, pese a lo cual, desde 1604 ninguno se había presentado con claridad ante los ojos terrestres. Los detectados en tiempos modernos se han registrado en galaxias alejadas de nosotros millones de años luz, y de ellos nos llegan hilillos de fotones que sólo pueden distinguir los instrumentos más sensibles.

La supernova 1987A, descubierta el 24 de febrero por Ian K. Shelton, del observatorio chileno Las Campanas, ha compensado el desequilibrio. Luce con gran viveza en la Gran Nube de Magallanes, una pequeña galaxia satélite de la Vía Láctea observable en el hemisferio meriodional, que sólo dista de la Tierra 170.000 años luz. 1987A ha regado la Tierra de fotones (detectables en forma de luz, ondas de radio y otras formas de radiación electromagnética), pero también de los escurridizos neutrinos que, según se cree, desempeñan un papel fundamental en la evolución estelar. Lo cual constituye de por sí un hito: hasta la fecha, sólo los fotones se habían asociado a una fuente específica allende el sistema solar.

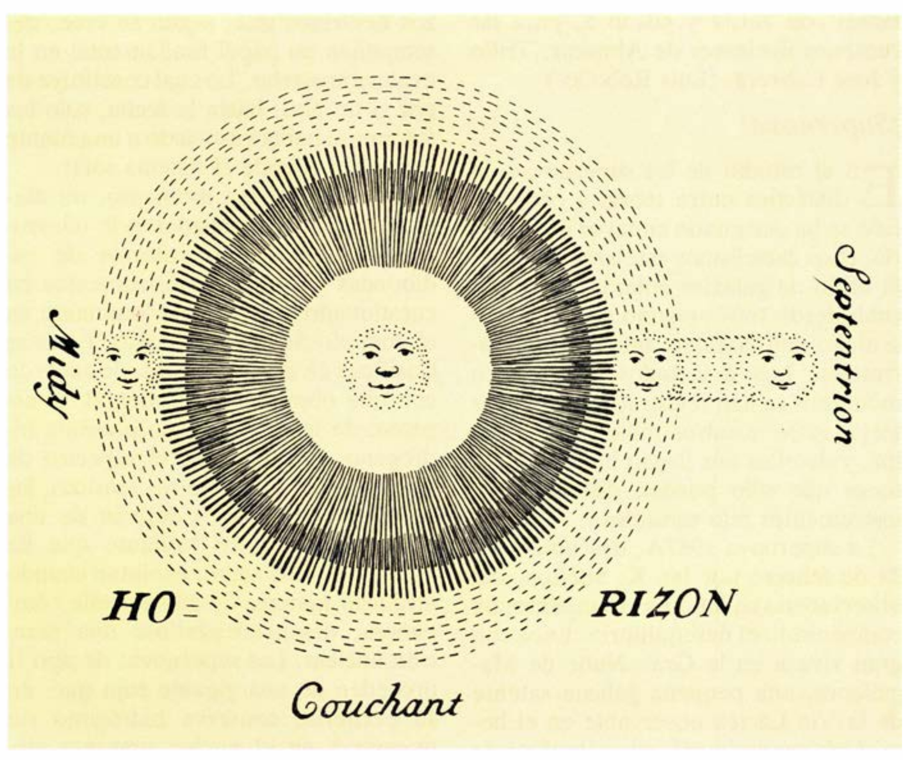
Desde el primer momento, un aluvión de datos recabados por telescopios, satélites, observatorios de radioondas y por otros instrumentos ha cuestionado la teoría predominante en el dominio de las supernovas. Estas se clasifican en dos categorías, de acuerdo con una observación elemental: el espectro de las de tipo I no presenta hidrógeno, mientras que el espectro de las de tipo II sí. Según los teóricos, las supernovas de tipo I derivan de una enana blanca poco brillante que ha agotado el hidrógeno; explotan cuando arrancan materia de una estrella compañera, desencadenándose una reacción nuclear. Las supernovas de tipo II proceden de una gigante roja que, en su periferia, conserva hidrógeno sin quemar y en el núcleo presenta elementos más pesados; cuando el núcleo alcanza cierta masa, colapsa y rebota, generando una onda de choque que arrastra consigo las capas exteriores de la estrella.

En sentido estricto, 1987A es del tipo II: la periferia de su capa en expansión abunda en hidrógeno. La detección de neutrinos procedentes de la supernova parece confirmar una de las principales hipótesis del modelo de tipo II: cuando colapsa el núcleo de una gigante roja hasta el estadio de "máxima contracción", el calor, intenso, genera gran cantidad de neutrinos, que se escapan en un potente pulso al rebotar el núcleo. Cuando menos dos detectores (los de Kamioka, Japón, y Fairfax, Ohio) registraron la llegada de ráfagas de neutrinos unas tres horas antes de la primera observación de 1987A.

En otros aspectos de interés 1987A se ha comportado como si naciera de una estrella pequeña, más proclive a generar una supernova de tipo I. La supernova adquirió su intensidad máxima al cabo de unos días, no de semanas, y no brilló con el fulgor que predecían los teóricos. Más curiosa aún resulta la incapacidad de los astrónomos para identificar la estrella progenitora cuya explosión creó 1987A. A diferencia de una enana blanca, el progenitor de tipo II (cuya masa, en teoría, multiplicaría la del sol al menos por ocho) debería detectarse de inmediato en las fotografías tomadas antes de que explotara la supernova.

Poco después de la aparición de 1987A, los científicos creyeron haber encontrado un candidato en el lugar apropiado: una supergigante azul denominada Sanduleak −69 202. Sanduleak no era exactamente lo que esperaban los teóricos pues, según se cree, las supergigantes azules son demasiado jóvenes y están demasiado calientes para explotar. El misterio se enmarañó al comprobarse que, a tenor de las lecturas del satélite *Explorador Ultravioleta Internacional*, Sanduleak parecía seguir intacta. Los investigadores han tenido que echar mano, una vez más, de placas antiguas para verificar si la imagen de Sanduleak muestra en realidad dos estrellas, tan estrechamente alineadas que semejan un solo punto, una de las cuales explotó. También se están analizando las compañeras cercanas de Sanduleak.

Según reconoce Roger A. Chevalier, de la Universidad de Virginia, 1987A "no parece ajustarse a la imagen convencional". En opinión de algunos astrónomos, la escasa coincidencia entre los datos y la teoría evidencia la debilidad de los modelos sobre supernovas de tipo I y tipo II. David J. Helfand, de la Universidad de Columbia, defiende la supresión de esas categorías. "El empleo de tales términos, afirma, sólo sirve para confundir." Otros disienten de ello. Robert P. Kirshner, de la Universidad de Harvard, afirma que "los modelos no nos han engañado. La observación de neutrinos confirma que nos hallamos en el buen camino".



2. HALO DE SCHEINER esbozado en 1677 por astrónomos de París. Las caras sonrientes situadas a la izquierda y a la derecha representan parhelios, manchas brillantes que a menudo acompañan a los halos solares

El halo de Scheiner

Transformando gotitas de agua en cristales de hielo con forma de diamante, dos investigadores austriacos acaban de ofrecer la prueba más sólida de que, en la naturaleza, los cristales de hielo pueden adoptar más de una configuración. Asimismo, los ensayos vienen a apoyar la hipótesis, formulada hace seis años, de que el hielo con forma de diamante produce un fenómeno atmosférico inusual: el halo de Scheiner.

Los cristales de hielo hallados hasta la fecha en la naturaleza son hexagonales. En la atmósfera superior suelen formar placas o columnas de seis lados que miden desde varios micrometros hasta varios milímetros de grosor. Al congregarse, por regla general en los brumosos cirros situados a unos 9000 metros de altitud, los cristales actúan a menudo de prismas, que refractan la luz de tal modo que el observador situado en tierra ve anillos de luz, los "halos", alrededor del sol, la luna o cualquier fuente luminosa.

Los cristales hexagonales generan halos de diversa anchura. El más común posee un radio de 22 grados (es decir, si se traza una línea que vaya desde el centro de la fuente luminosa hasta el ojo del observador y otra que vaya de ahí hasta el borde exterior del halo, ambas forman un ángulo de 22 grados). El halo se crea cuando la luz se refracta en el prisma de 60 grados que forman las caras alternas del perímetro del cristal hexagonal. Otro halo, menos habitual, producido por la refracción de la luz en el prisma de ángulo recto que forman la base de una columna y uno de sus lados, posee un radio de 45 grados.

Ninguna de las posibles orientaciones de los cristales hexagonales producirá un halo cuyo radio mida 27,5 grados, el halo de Scheiner, nombre que lleva en honor de Christophe Scheiner, astrónomo jesuita que lo descubrió, en 1629, en Roma. El extraño fenómeno sólo se ha visto siete veces en toda la historia; la última aparición conocida la detectaron en París, en 1920, meteorólogos franceses.

En 1981, Edward Whalley, del Consejo canadiense de Investigación, propuso que el halo de Scheiner quizá lo produjeran cristales en forma de diamante, es decir, octaedros. Whalley, autoridad en la estructura molecular

del agua, señaló que el prisma de 71,5 grados que forman las dos caras superiores de los octaedros podrían desviar la luz los 27,5 grados requeridos.

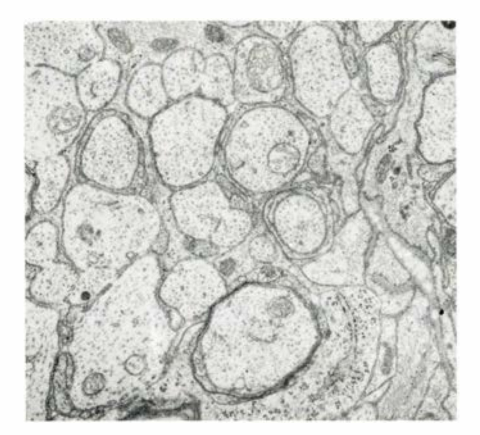
La hipótesis presentaba un punto flaco: se obtuvo cristales octaédricos de hielo condensando vapor de agua a temperaturas extremadamente bajas, pero los cristales se deformaban inmediatamente en otros de tipo hexagonal al exponerlos a las temperaturas atmosféricas. Erwin Mayer y Andreas Hallbrucker, de la Universidad de Innsbruck, han venido a colaborar en la resolución de ese problema de estabilidad. Según informan en *Nature*, han creado cristales octaédricos congelando gotitas de agua de varios micrometros de diámetro, el tamaño de las que suele haber en los cirros. Para crear los cristales seguía requiriéndose la aplicación de temperaturas extremadamente bajas (de alrededor de −80 grados Celsius), pero muchos resistían sin transformarse hasta media hora o más después de caldearlos hasta los −40 grados, temperatura habitual en la atmósfera superior.

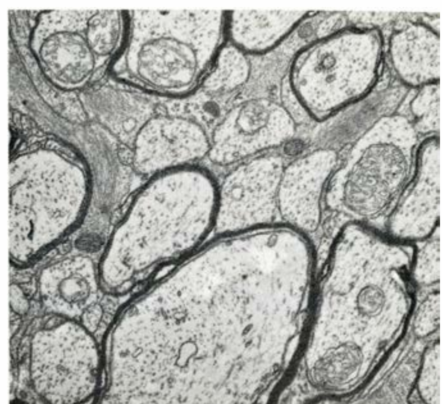
Whalley cree que el halo de Scheiner, sin dejar de constituir un fenómeno extraordinario, se produce más a menudo de lo que refleja el registro. De los siete avistamientos reseñados, seis se efectuaron en observatorios no automatizados. La escasez de informes en épocas modernas quizá se deba más a la creciente automatización de las observaciones meteorológicas y astronómicas que a que las condiciones atmosféricas hayan sido desfavorables.

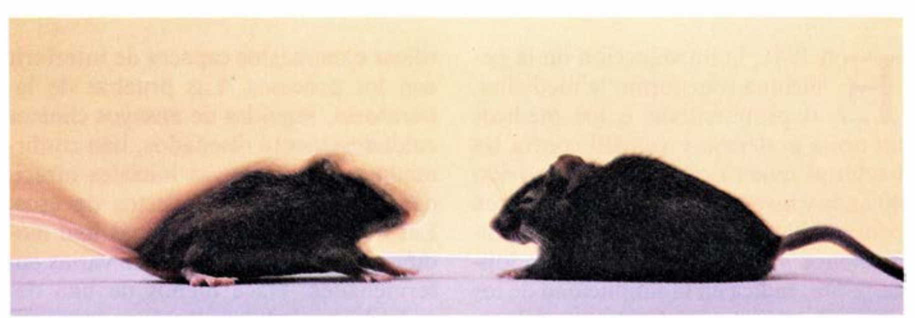
Sin tiritera

Los ratones afectados de cierta enfermedad hereditaria presentan un defecto en el aislamiento de los nervios que les provoca una tiritera incontrolable; mueren a edad temprana. Un grupo de investigadores del Instituto de Tecnología de California (Caltech) y la Facultad de Medicina de Harvard han reparado el defecto por medio de cirugía genética. Su logro, del que informan en *Cell*, constituye un medio de exploración del papel que desempeña una proteína específica en la arquitectura nerviosa. En términos más generales, el trabajo demuestra la potencia de la transferencia génica en el estudio, por separado, de los componentes de estructuras complejas.

Los ratones homocigotos para la mutación "shiver" (tiritera) empiezan a temblar alrededor de 12 días después del nacimiento y mueren al cabo de 90 días. Carecen de las dos copias del gen que determina la proteína básica de la mielina (PBM), en realidad una familia entera de proteínas emparentadas que representan del 30 al 40 por ciento de las proteínas de la mielina del sistema nervioso central. La mielina ciñe a los nervios y, puesto que se trata de un aislante, acelera la transmisión de las señales nerviosas e impide el cruce de señales entre fibras adyacentes.







3. RATON CON TIRITERA y otro en el que el defecto genético se ha mitigado; sobre ellos aparecen micrografías electrónicas de secciones de nervios ópticos. Los axones de un ratón afectado (**izquierda**) *carecen de las vainas de mielina que actúan de aislantes; en un ratón "curado"* (**derecha**) *se distingue ya mielina*

Para confirmar que la causa de la enfermedad era la falta del gen PBM y de la proteína que determina, el grupo, dirigido por Leroy E. Hood, del Caltech, introdujo artificialmente el gen en las células germinales de ratones interesados. En primer lugar, por clonación en bacterias, Hood y sus colegas obtuvieron múltiples copias del gen, que otros autores habían aislado anteriormente. El equipo introdujo a continuación 200 copias del gen en núcleos de huevos (óvulos fecundados) de ratones afectados del mal e implantaron los huevos en madres adoptivas. En uno de los 300 ratones el gen PBM transferido se integró en el ADN y se expresó.

Cruzando ratones transgénicos de la primera generación los científicos obtuvieron animales que portaban dos copias del nuevo gen y presentaban un 25 por ciento del nivel normal de PBM y que, en esencia, eran normales. Seguidamente el grupo cruzó ratones que portaban una o dos copias del transgén con animales afectados de otra mutación, que reducía la expresión de PBM al 5 por ciento del nivel normal y provocaba una enfermedad leve. De los cruzamientos se obtuvo una población cuyos niveles de PBM iban desde un 5 hasta un 30 por ciento del nivel normal.

Por observación de los animales y examen microscópico de la vaina de mielina que rodeaba sus nervios, el equipo analizó el efecto de diversos niveles de PBM sobre el desarrollo de la vaina y sobre la gravedad de la tiritera. "Los ratones que presentaban algo de mielina, afirma Hood, vivían más tiempo; los que poseían algo más ya no temblaban y, los que portaban más aún (un 25 por ciento del valor normal), superaban los trastornos de tiritera."

Los humanos no padecen ningún mal de tiritera que pueda someterse a una cura comparable. Sin embargo, según Hood, el interés de ese trabajo consiste en que prueba la viabilidad de un "método totalmente nuevo de estudio de estructuras u orgánulos complejos, como los nervios, ribosomas o mitocondrias". La manipulación genética individualizada de sus componentes permitirá "modificar una variable de entre un complejo juego de variables" para disecar su función.

Terapia antivírica

¿Cómo matar un virus sin dañar la célula hospedadora en la que está física y funcionalmente incorporado? Nuevas drogas antivíricas explotan las sutiles diferencias moleculares que distinguen al agente vírico del hospedador

Martin S. Hirsch y Joan C. Kaplan

En 1941, la introducción de la penicilina transformó la medicina, al proporcionar a los médicos un arma poderosa y versátil contra las bacterias infecciosas. Han transcurrido 40 años y no se dispone de una panacea comparable para luchar contra las infecciones víricas. La razón, paradójicamente, radica en la simplicidad de los virus. Para que una droga mate el patógeno sin envenenar al paciente debe distinguir al invasor de las células propias del paciente. Puesto que las bacterias son organismos relativamente complejos, suelen presentar muchas diferencias metabólicas respecto de las células de los mamíferos y pueden reproducirse fuera de las células del hospedador. Son, funcional y físicamente, distintas, lo cual simplifica el problema de encontrar sustancias que las ataquen específicamente.

La simplicidad de los virus, por el contrario, les permite replicarse solamente cuando invaden una célula y secuestran sus mecanismos bioquímicos para fabricar nuevo material genético y proteínas víricas. Dado que su ciclo de replicación está íntimamente conectado con las funciones de la célula hospedadora, ofrecen menos características bioquímicas que les sean peculiares y que permitan un ataque selectivo. Efectivamente, hasta comienzos de la década de 1960 se consideraba irresoluble el problema de distinguir las funciones víricas de las celulares. Por ello, la principal estrategia utilizada para controlar las infecciones víricas (y que en gran medida sigue siéndolo) era el desarrollo de vacunas, que no atacan directamente al virus, sino que impiden que se inicie la infección, estimulando previamente el sistema inmunitario del hospedador.

Sin embargo, durante las dos últimas décadas los avances registrados en el conocimiento de la replicación de los virus ha permitido definir fenómenos y pasos exclusivos de esos agentes e identificar compuestos capaces de interferir con los procesos. Las pruebas de laboratorio, seguidas de ensayos clínicos cuidadosamente diseñados, han confirmado las perspectivas iniciales ofrecidas por algunos compuestos de esos. Las nuevas drogas antivíricas han modificado ya el tratamiento de varias enfermedades. Hace menos de una década, las probabilidades de supervivencia del recién nacido que sufriera una infección general por herpes simplex o del adulto afectado de encefalitis herpética (una infección del cerebro) sólo eran del 20 al 30 por ciento; hoy, el tratamiento precoz y agresivo con aquellas drogas ha duplicado esas cifras. En las investigaciones de laboratorio y en los ensayos clínicos se están aplicando las lecciones aprendidas durante los últimos 20 años para hacer frente a un nuevo reto: diseñar y establecer terapias para luchar contra el SIDA (síndrome de inmunodeficiencia adquirida), una enfermedad vírica mortal descrita en 1981.

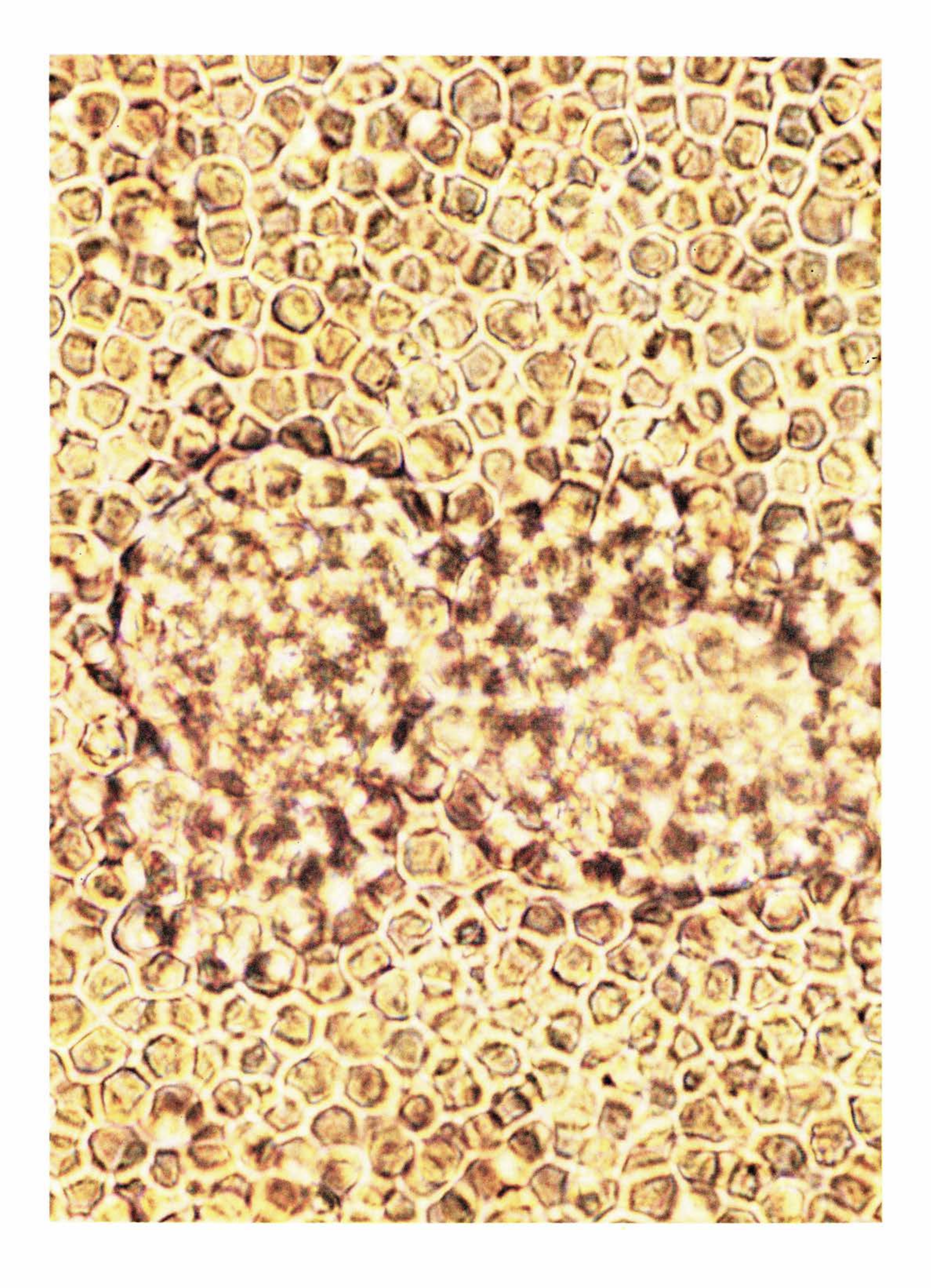
Modos de infección

Los intentos ordenados al tratamiento de las infecciones víricas deben tener en cuenta la gran variedad de vías por las que los virus interactúan con las células hospedadoras. Al infectar una célula, el virus se une a la superficie de la membrana, penetra luego en la célula y se desprende de su cubierta de proteína. El material genético, que puede ser una molécula monocatenaria o bicatenaria, de ADN o de ARN, porta genes que especifican la síntesis de unas pocas enzimas y proteínas estructurales que el virus necesita en su interacción con las células y en su reproducción. La maquinaria bioquímica del hospedador expresa los genes durante los últimos pasos del ciclo de replicación del virus.

Esos últimos pasos determinan el tipo de infección que vaya a producirse. En una infección lítica, característica de muchos virus de ADN y ARN, incluidos los que causan el catarro común y la poliomielitis, el virus se replica induciendo a la célula a que copie el material genético del virus y a que fabrique proteínas víricas. Se forman multitud de viriones y la célula infectada se lisa: estalla liberando las partículas. Las infecciones líticas suelen extenderse rápidamente por la población de células vulnerables, destruyéndolas en los primeros estadios de la enfermedad. Por tanto, el tratamiento adecuado contra la mayoría de las infecciones líticas debe administrarse muy pronto y requiere tanto un diagnóstico rápido como una droga eficaz.

La replicación del virus en otra clase de infecciones, las persistentes, no siempre mata a la célula infectada. En la infección persistente, las partículas nuevas suelen liberarse de manera gradual; la célula sobrevive, pero su función puede sufrir sutiles cambios. La persistencia puede adoptar otra forma, en la que algunas células sufren infección de tipo lítico y otras no resultan afectadas. En ambos casos, la infección puede perdurar durante meses o años sin causar una enfermedad manifiesta. El virus de la hepatitis *B*, por ejemplo, instaura infecciones que en ocasiones persisten indefinidamente y que sólo a veces llegan a provocar una enfermedad hepática, así cáncer o una vasculi-

1. REPLICACION VIRICA NO INHIBIDA que ha dañado las células humanas de un cultivo infectado con el virus de la inmunodeficiencia humana (HIV), el agente causal del SIDA. Los componentes de la envoltura del virus, sintetizados mientras éste se multiplicaba, han alterado la membrana superficial de estas células *T*, el hospedador preferido del HIV, fomentando su agrupación en estructuras plurinucleadas denominadas sincitios. En las pruebas de laboratorio que se realizan con drogas antivíricas contra el SIDA, una medida de la eficacia de una sustancia es su capacidad de impedir que se desarrollen sincitios en un cultivo infectado.



tis. Los virus de la leucemia humana y el virus de la inmunodeficiencia humana (HIV), la causa del SIDA, también pueden producir los síntomas tras una prolongada infección persistente (HIV es la denominación aceptada para designar el virus llamado originalmente LAV, o HTLV-III).

Tanto en las infecciones líticas como en las persistentes, el ciclo de replicación del virus comprende diversos pasos exclusivos, que podrían interrumpirse por medio de una droga antivírica. Una tercera clase de infección, la latente, no ofrece esas oportunidades. Los virus latentes no se reproducen y, por tanto, no se registran las actividades bioquímicas que acompañan a la replicación. Resulta difícil detectar ese tipo de infecciones, pues no las revela la muerte de las células infectadas ni la producción de nuevas partículas víricas. El material genético del virus puede integrarse en los cromosomas de la célula y hacerlo de suerte tal que durante la división celular los genes del virus se repliquen junto con los genes de la célula y se transmitan a las células hijas. En ciertas condiciones pueden reactivarse los virus latentes de unas cuantas células infectadas, desarrollándose entonces una infección activa.

La alternancia entre períodos de latencia y de replicación activa caracteriza a muchos virus herpes, como el simplex (causante de un amplio abanico de enfermedades, desde el herpes febril al herpes genital), el varicella zoster (agente de la varicela y del herpes cutáneo), los citomegalovirus y el virus de Epstein-Barr. Las drogas antivíricas desarrolladas hasta el momento atacan a esos virus sólo cuando se están replicando. Atacar al virus latente exige distinguir su material genético del material genético de las células circundantes y destruirlo de modo selectivo. Queda en este campo de la virología mucho por avanzar.

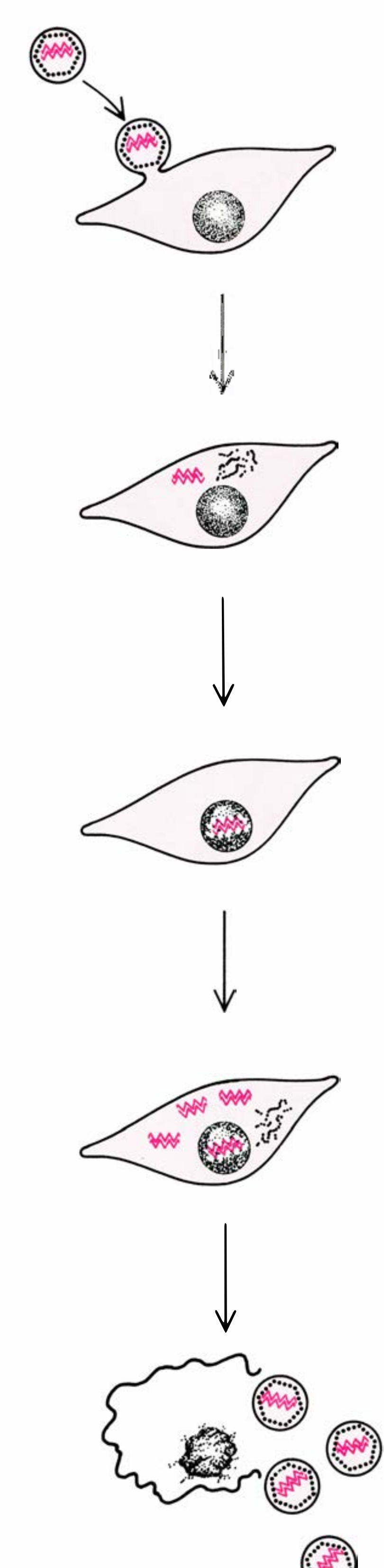
Cómo se desarrolla una droga

El conocimiento del ciclo de replicación de un virus y de su interacción con las células del hospedador puede sugerir funciones víricas específicas que serían vulnerables a un ataque. El camino que lleva desde ese primer paso teórico hasta la obtención de una droga antivírica eficaz es largo y costoso. El hallazgo de una sustancia que inhiba una función del virus puede comportar el rastreo exhaustivo de centenares de compuestos. Ante la aparición de algún signo de actividad antivírica, el compuesto candidato se somete a pruebas de laboratorio que calibrarán con mayor precisión su eficacia y toxicidad.

El compuesto se somete entonces a nuevos ensayos, ahora con células infectadas con virus, incluidas las de origen humano. Se analizan diversas concentraciones, tanto de la droga como del virus. Se evalúa la eficacia de la droga midiendo la producción de virus y proteínas víricas y observando el daño causado a las células (por ejemplo la lisis) por replicación vírica. Simultáneamente se controla en las células del hospedador la aparición de signos de toxicidad. Las preparaciones de virus frente a las que se ensaya el compuesto deben incluir virus aislados de pacientes infectados, así como cepas de laboratorio, que en muchos casos se han mantenido durante años en cultivos aislados, por lo que pueden haber acumulado cambios genéticos que quizá distorsionen su respuesta a la droga.

Si las perspectivas iniciales ofrecidas por el compuesto se confirman *in vitro*, se procede a explorar la farmacocinética de la droga, es decir, cómo la transporta, metaboliza y excreta el organismo, administrándola en primer lugar a animales. La capacidad de ciertos virus, incluido el HIV, de atacar el cerebro y la médula y de formar allí un reservorio potencial de virus, tiene gran interés en algunos estudios con animales. La especial naturaleza de los capilares del cerebro crea una barrera hematoencefálica que impide que muchos compuestos penetren en el sistema nervioso central. Los estudios con animales ofrecen la oportunidad de observar la capacidad de la droga para atravesar esa barrera hematoencefálica. Proporcionan, además, información adicional sobre la toxicidad de la droga. Sin embargo, con frecuencia los ensayos realizados en animales no pueden demostrar la eficacia de una droga, pues muchos virus humanos son incapaces de infectar a otras especies o, si lo logran, no producen ningún signo de enfermedad.

A los estudios con animales siguen los primeros ensayos en pequeños grupos de pacientes. Esas pruebas clínicas de fase I ofrecen más información sobre la farmacocinética de la droga candidata y sobre su inocuidad. Sirven,

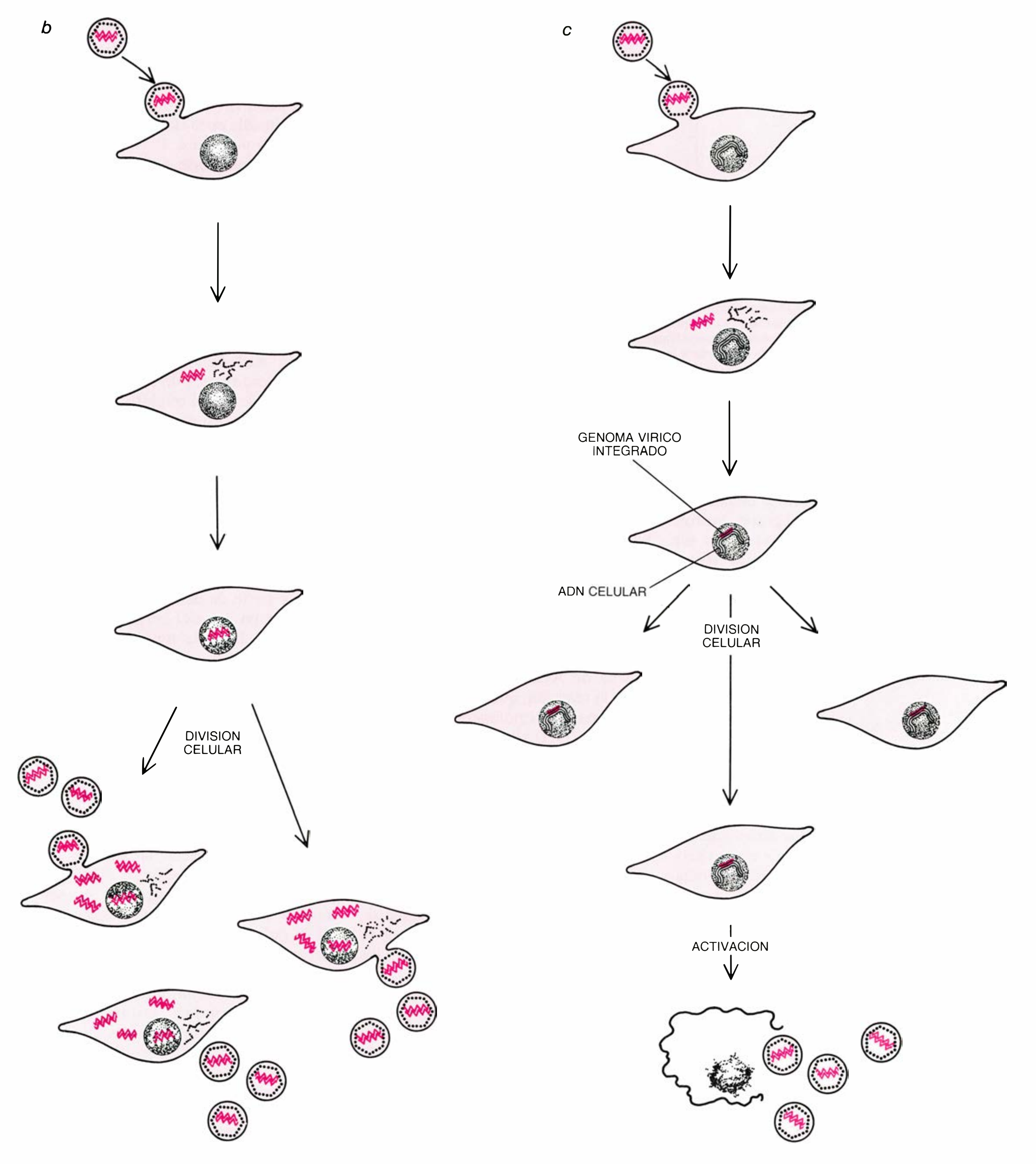


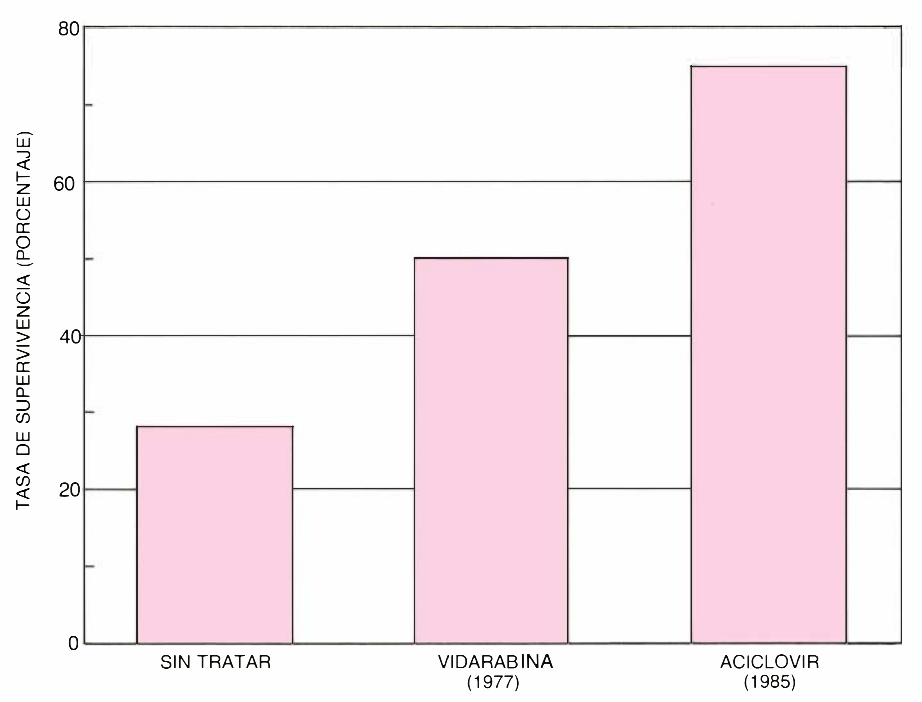
2. VIRUS Y CELULAS HOSPEDADORAS pueden interactuar de diversas maneras, en función del tipo de virus y de célula. La infección lítica (*a*) conlleva la muerte de la célula infectada. Tras abandonar su cubierta de proteína, el material genético vírico secuestra la maquinaria bioquímica de la célula y fabrica proteínas y nuevo material genético, que a continuación se ensamblan en nuevas partículas de virus. La célula hospedadora muere y se liberan las partículas. En una infección persistente (*b*) también se replica el virus, pero la célula sobrevive y sigue multiplicándose, sin dejar de liberar virus. En las infecciones latentes (*c*) la replicación vírica se suspende. El genoma del virus puede integrarse en los cromosomas de la célula, copiándose y transmitiéndose a las células hijas en el transcurso de la división celular. Bajo ciertas circunstancias, en algunas células infectadas los virus latentes se reactivan.

principalmente, para indicar la dosis máxima tolerable de droga.

Los ensayos clínicos a gran escala constituyen la prueba final de la seguridad y eficacia de un fármaco. Deben realizarse sobre una población de pacientes cuidadosamente elegida. Con frecuencia es importante, por ejemplo, que los pacientes que participan atraviesen una etapa similar de la enfermedad. Puesto que la replicación del virus puede alcanzar su máximo poco después de manifestarse la enfermedad clínica, a menudo debe ensayarse la droga candidata en pacientes de diagnóstico reciente.

La mayoría de las infecciones víricas cursan de modo muy diverso, de ahí que los informes sobre casos anecdóticos de respuesta a la droga carezcan de significado. Por tanto, los ensayos, rigurosamente objetivos, deben controlarse con sumo cuidado. De no existir tratamiento establecido para la infec-





3. TASA DE SUPERVIVENCIA de pacientes con encefalitis causada por herpes simplex, una infección del cerebro; se ha elevado espectacularmente desde que se dispone de drogas nuevas y eficaces contra las infecciones de virus herpes. En 1977 se comprobó que el tratamiento con vidarabina aumentaba la supervivencia, gracias a la capacidad del compuesto de interferir la síntesis de ADN vírico y, por tanto, la replicación del agente infeccioso. En 1985 se descubrió que la eficacia del aciclovir era mayor aún. Las características de la replicación del herpes simplex convierten al virus en singularmente vulnerable al aciclovir y drogas afines.

ción, se opta por la comparación frente a un placebo. La población sometida a ensayo suele dividirse al azar en dos o más grupos, de los cuales al menos uno recibe la droga y otro, el grupo control, recibe el placebo. El método suele ser a doble ciego; es decir, ni los pacientes ni los investigadores saben de antemano quién recibe la droga. Ese tipo de ensayos, tediosos y caros, han permitido establecer con firmeza, durante la última década, la eficacia de la actual generación de drogas antivíricas.

Una droga modelo

Un éxito notable del desarrollo racional y satisfactorio de drogas es el aciclovir, compuesto cuya comercialización se ha autorizado recientemente. Se trata de un inhibidor altamente específico de la replicación de ciertos herpesvirus. Ha sustituido en gran medida a las anteriores generaciones de drogas antiherpes, de acción menos eficaz y específica.

La estructura de la molécula ofreció el primer indicio de que el aciclovir podría inhibir una función del virus, concretamente la síntesis de nuevo ADN durante la replicación vírica. La droga es un análogo de un nucleósido: su estructura mimetiza la estructura de un nucleósido, un precursor del ADN o del ARN. Cada nucleósido porta una base, de cuatro posibles, perteneciente a un grupo de compuestos químicos denominados pirimidinas o purinas, según estén dotadas de uno o dos anillos, unida a un azúcar de cinco átomos de carbono. Del mismo modo, un análogo de un nucleósido está formado por una base, o un derivado de una base, y un azúcar, o un grupo del tipo de los azúcares.

En el curso normal de la síntesis de ADN, los nucleósidos trifosfatos libres (nucleósidos que llevan tres grupos fosfato) reaccionan con el extremo de una cadena de ADN en crecimiento. Durante la reacción, que está mediada por la enzima ADN polimerasa, un grupo hidroxilo (OH) situado en la posición 3′ del anillo del azúcar que ocupa el extremo de la cadena forma un enlace con el grupo fosfato de la posición 5′ del nucleósido trifosfato que se incorpora. Se liberan los otros dos grupos fosfato y así queda incorporado un nucleótido (un nucleósido que lleva un solo fosfato) a la cadena de ADN.

Al adquirirse, durante la década de 1950, un conocimiento suficiente de la síntesis del ADN, se evidenció que los nucleósidos que presentaran alguna alteración química (es decir, los análogos de nucleósidos) podrían obstaculizar aquel proceso. Se empezó por sintetizar análogos de nucleósidos para utilizarlos como drogas anticancerosas pues, según se creía, habrían de retrasar o bloquear la acelerada producción de ADN que tiene lugar en las células tumorales, que se dividen a gran velocidad. En los años 1960 se conocía algunos virus que instaban una rápida síntesis de ADN en las células infectadas, frente a los cuales se ensayó la actividad antivírica de muchos análogos de nucleósidos. Entre los compuestos en los que se cifró cierta esperanza se contaba el aciclovir.

De inmediato se vio que el aciclovir poseía un notable efecto específicamente antivírico. Se encontró que la síntesis de ADN por parte de ciertos herpesvirus era exquisitamente sensible al aciclovir, mientras que la droga apenas incidía en la síntesis de ADN de las células normales. Tras una década de trabajo realizado por Gertrude B. Elion y sus colegas, de los Laboratorios Wellcome de Investigación de Carolina del Norte, se desentrañaron los mecanismos que subyacen a la acción antivírica específica de la droga.

Según comprobaron los investigadores, para que una molécula de aciclovir bloqueara la síntesis del ADN vírico debía adquirir tres grupos fosfato, igual que un nucleósido debía fosforilarse por triplicado antes de tomar parte en la síntesis de ADN celular. Todas esas fosforilaciones estaban mediadas por la enzima denominada quinasa.

El papel de las quinasas en la célula consiste en transferir grupos fosfato de una molécula a otra. Las quinasas celulares median la formación de difosfato y trifosfato de aciclovir, pero el paso inicial, la conversión del aciclovir en monofosfato de aciclovir, depende en gran parte de una quinasa determinada por un gen del herpesvirus. Esa enzima, la llamada timidina quinasa, sólo se encuentra en las células infectadas. En las que no lo están, una enzima celular fosforila el aciclovir, pero en muy baja proporción, de tal modo que la cantidad de aciclovir trifosfato que se produce es varios órdenes de magnitud menor que la cantidad formada en las células infectadas. Así, la droga actúa primordialmente en las células infectadas.

Además, al atacar la síntesis de ADN, el aciclovir prefiere el ADN del virus. Dado que el compuesto se asemeja a un verdadero nucleósido, las ADN polimerasas se unen al aciclovir activado (triplemente fosforilado) y añaden una unidad de monofosfato de aciclovir a la cadena de ADN en crecimiento, liberándose dos grupos fosfato. Por razones todavía sin aclarar, la ADN polimerasa de los herpesvirus muestra mucha más afinidad por la droga que por la polimerasa celular; de ahí que las moléculas de aciclovir monofosfato se agreguen preferentemente al ADN vírico. Cuando se incorpora la

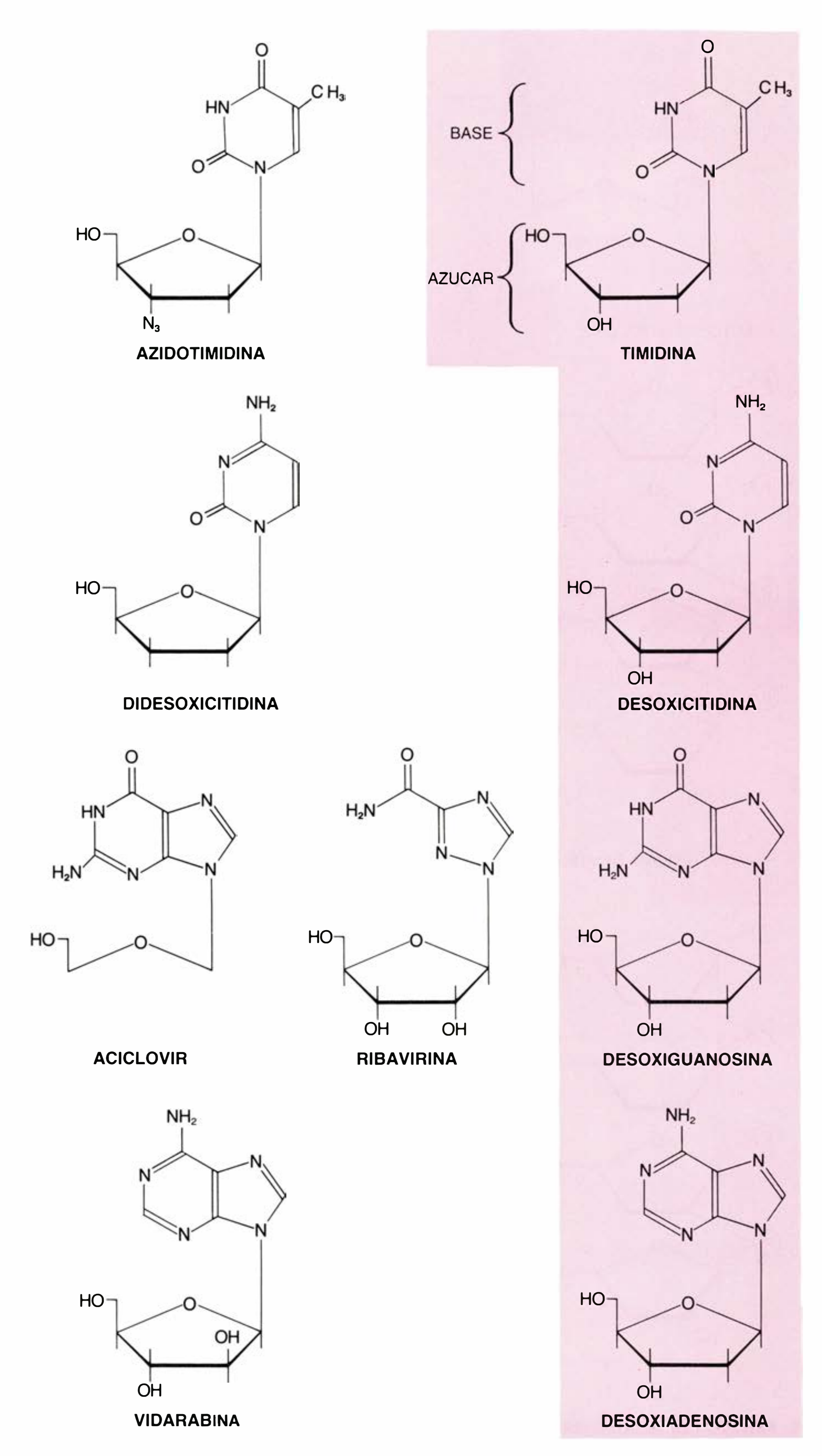
droga, forma un enlace con el grupo hidroxilo 3′ situado en el extremo de la cadena, igual que haría un nucleósido convencional. A diferencia de los nucleótidos genuinos, sin embargo, el aciclovir monofosfato carece de grupo hidroxilo 3′: no ofrece punto de fijación para el enlace siguiente. Con la incorporación del aciclovir monofosfato cesa el crecimiento de la cadena de ADN.

Es más, mientras que la unión de las ADN polimerasas a la cadena de ADN en crecimiento suele ser temporal, de tal manera que la enzima puede catalizar indefinidamente el crecimiento de cadenas, el aciclovir monofosfato hace que la asociación sea permanente. La polimerasa vírica queda irreversiblemente unida al nucleótido fraudulento que acaba de añadir al ADN. Se cancelan, a la vez, el crecimiento de la cadena de ADN vírico y la eficacia de la polimerasa vírica. La especial afinidad del aciclovir por las enzimas víricas genera una potente acción antivírica con un mínimo de toxicidad para la célula hospedadora.

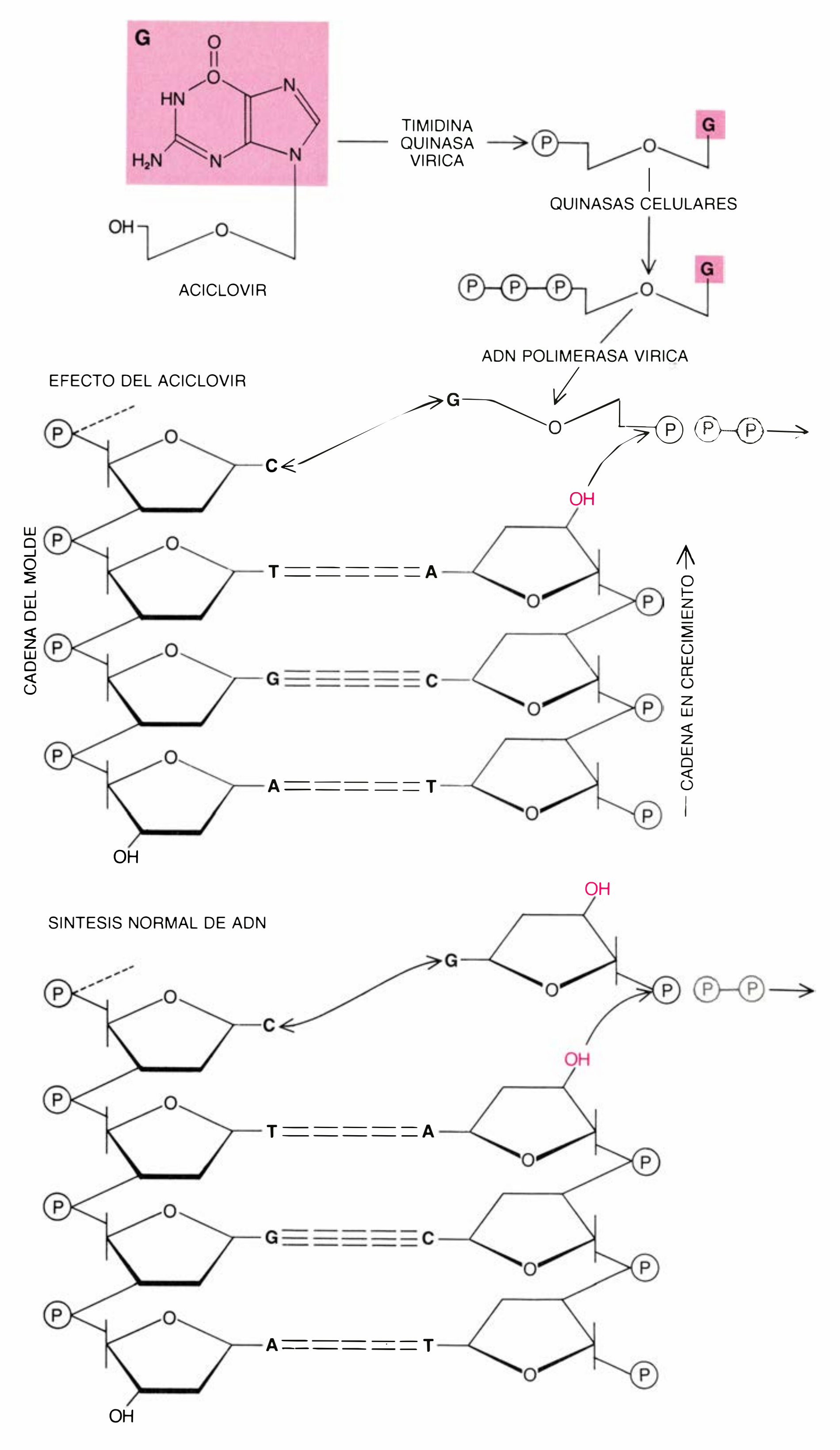
Aplicaciones del aciclovir

Se emplea principalmente el aciclovir en el tratamiento de infecciones genitales de herpes simplex que, según se calcula, afectan a más de 20 millones de personas sólo en los Estados Unidos. El ataque inicial, es decir, el episodio de infección lítica, suele ser el más grave y prolongado, por lo que constituye el momento más propicio para la utilización terapéutica de la droga. El tratamiento con aciclovir (que puede administrarse por vía intravenosa, como pomada o por vía oral) suprime los síntomas, reduce la cantidad de virus infecciosos liberados por los herpes febriles y acelera la cicatrización. El tratamiento no previene los subsiguientes ataques ni disminuye su frecuencia o gravedad. Los tratamientos profilácticos con aciclovir por vía oral pueden tener un modesto impacto sobre las infecciones recurrentes, pero el costo de la droga y su toxicidad potencial a largo plazo no justifican, en la mayoría de los casos, esa práctica.

La droga ha resultado también beneficiosa en las infecciones causadas por virus varicella zoster (varicela y herpes cutáneo). En pacientes cuyo sistema inmunitario se ha suprimido para realizar un trasplante de órgano o bien se ha alterado por causa de alguna enfermedad, el aciclovir sirve a veces como agente profiláctico para prevenir infecciones por herpes simplex y varicella zoster, a las que son susceptibles los pacientes inmunosuprimidos. La



4. ANALOGOS DE NUCLEOSIDOS, clase de compuestos sintéticos que deben su nombre y sus efectos antivíricos a su parecido con los nucleósidos, los precursores del ADN y el ARN. La ilustración muestra diversos análogos de nucleótidos prescritos para luchar contra infecciones víricas o que se están sometiendo a pruebas clínicas. Los análogos se muestran junto con sus correspondientes nucleósidos (*color*). Están éstos formados por una base de uno o dos anillos, unida a un azúcar de cinco átomos de carbono; el análogo difiere del nucleósido en alguna característica, mayor o menor, de la base o del azúcar. Las enzimas que suelen actuar sobre un nucleósido en el curso de la replicación del virus pueden unirse también al análogo. Sin embargo, debido a las diferencias existentes entre el nucleósido y el análogo, en ocasiones la fijación a éste incapacita a la enzima, desbaratándose así un proceso molecular importante para la replicación. Ciertos análogos de nucleósidos suman a ello propiedades que aumentan la especificidad y eficacia de los mismos.



5. EFECTO DEL ACICLOVIR en una infección por virus herpes; consiste en inhibir la síntesis del ADN vírico. En primer lugar, el aciclovir debe adquirir tres grupos fosfato (*P*). La droga emplea la timidina quinasa, enzima especificada por algunos virus herpes, para adquirir su primer fosfato (*arriba*); las quinasas celulares le añaden los otros dos. Seguidamente, cual si se tratara de un nucleósido trifosfato ordinario (un sillar estructural del ADN), al fármaco se le une la ADN polimerasa del virus, enzima que cataliza la síntesis de ADN vírico y lo añade a una cadena de ADN en crecimiento (*centro*). Uno de los fosfatos de la molécula de aciclovir trifosfato forma un enlace con el grupo hidroxilo 3′ del anillo del azúcar situado en el extremo de la cadena; los otros dos fosfatos se liberan. A diferencia de lo que sucede en un nucleósido ordinario (*abajo*) el aciclovir carece de anillo de azúcar y de grupo hidroxilo 3′. Por consiguiente, no permite el crecimiento subsiguiente de la cadena. Además, la ADN polimerasa del virus queda retenida permanentemente en un complejo formado por el ADN y la droga y se ve incapacitada para catalizar subsiguientes adiciones.

droga puede prevenir también, en esos pacientes, la reactivación de una infección latente de herpes. Por último, el aciclovir es responsable del espectacular descenso de la tasa de mortalidad debida a encefalitis por herpes simplex que se registró durante la última década.

El aciclovir podría llegar a chocar con el mismo problema que ha entorpecido el uso de las drogas antibacterianas durante muchos años: la aparición de patógenos resistentes al fármaco. En el laboratorio pueden generarse virus mutantes resistentes a la droga cultivando el virus en presencia de aciclovir. También se han aislado cepas resistentes a partir de pacientes. La resistencia del aciclovir puede tener varios orígenes genéticos. Nace, por ejemplo, de la mutación que inactive el gen vírico para la timidina quinasa. Se produce también porque la timidina quinasa vírica esté alterada en virtud de una mutación y se haya reducido su afinidad por el aciclovir. En ambos casos, no se fosforila aciclovir en las células infectadas, por lo que el fármaco no se activa. Según datos obtenidos de modelos animales, parece que los mutantes afectados en su timidina quinasa son menos patógenos que las cepas no mutantes y, además, están menos capacitados para establecer infecciones latentes.

La resistencia puede surgir también de un cambio debido a una mutación de la ADN polimerasa del virus, que reduzca su capacidad de interactuar con el aciclovir trifosfato. Los estudios de laboratorio sugieren que, contrariamente a lo que sucede con los mutantes en los que se ha modificado la timidina quinasa, esas cepas mutantes pueden ser tan patógenas como lo es el virus sensible a la droga. Este hallazgo apunta que la administración prolongada de aciclovir como agente profiláctico, o su prescripción para combatir infecciones triviales, podría favorecer la aparición de cepas del virus que sean, a la vez, resistentes a la droga y a los patógenos.

Para luchar contra los mutantes resistentes al aciclovir y contra herpesvirus como los citomegalovirus o el virus de Epstein-Barr que, según se sabe, portan el gen que codifica la timidina quinasa y, por tanto, son relativamente insensibles al aciclovir, existen estrategias alternativas. La DHPG (dihidroxi-propoximetil guanina), análogo de nucleósido recientemente sintetizado, presenta gran actividad frente a esos virus herpéticos, tanto *in vitro* como en pacientes, si bien no se conoce

todavía en detalle el modo de acción de la droga. La vidarabina, compuesto que constituyó el principal tratamiento de las gravísimas infecciones por virus herpes antes de disponerse de aciclovir, puede actuar también en ausencia de la timidina quinasa. Como el aciclovir, la vidarabina es un análogo de nucleósido que se activa en la célula mediante una triple fosforilación y que luego se interpone en la síntesis del ADN vírico.

Otras sustancias antivíricas

Las infecciones respiratorias provocadas por virus siguen constituyendo una importante causa de enfermedad, pero el desarrollo de drogas antivíricas ha permitido ciertos avances en el tratamiento de la gripe y de las dolencias atribuidas a virus respiratorios sincitiales, como son la pneumonía y la bronquiolitis en lactantes y niños. La amantadina y la rimantadina, compuestos en los que se apoyan los avances en la lucha contra la gripe, datan de fecha anterior a los recientes progresos en terapia antivírica. Su efectividad contra la gripe *A* se descubrió a comienzos de la década de 1960, en el curso de un escrutinio de laboratorio sobre un gran número de compuestos. Se desconocen los pormenores de su modo de acción. Algunos investigadores han propuesto que la droga impide que el virus de la gripe *A* se despoje de su cubierta tras la infección de la célula, o que interfiera en los pasos iniciales de la transcripción del material genético del virus en ARN mensajero (ARNm), que luego sirve de molde para la síntesis de proteína. En los Estados Unidos sólo está autorizado el uso de la amantadina y suele administrarse, sobre todo, como agente profiláctico contra la infección cuando se produce un brote de gripe.

El esfuerzo más reciente para bloquear ciertos pasos, específicos, de la replicación del virus por medio de análogos de nucleósidos ha proporcionado una droga contra el virus respiratorio sincitial. Se trata de la ribavirina, análogo de la guanosina que, *in vitro*, actúa contra una amplia gama de virus; también ha mostrado cierto efecto en ensayos clínicos contra la fiebre de Lassa, una enfermedad vírica endémica en Africa.

Según se cree, la eficacia de la ribavirina refleja al menos dos actividades bioquímicas. La ribavirina fosforilada obstaculiza la intervención de una enzima de importancia decisiva para la síntesis de los precursores de la guanosina del ADN y ARN. El parecido de esa droga con la guanosina le permite, además, inhibir la formación de la "caperuza" del ARNm, es decir, la adición de una molécula de guanosina modificada al extremo del ARNm recién transcrito. Al parecer, la caperuza posibilita que el ARNm se una a los ribosomas, las estructuras celulares donde se fabrican las proteínas. El proceso de formación de la caperuza (o "capping") es universal, pero el efecto inhibidor de la ribavirina es selectivo. Inhibe el del ARNm de los virus y, de ese modo, la producción de proteínas víricas, mucho más de lo que afecta a las correspondientes funciones de las células humanas.

Aun así, cuando se administra por vía oral, la ribavirina puede resultar tóxica para las células sanguíneas y provocar anemia. Ensayos recientes han demostrado, sin embargo, que actúa contra el virus respiratorio sincitial si se administra en forma de aerosol, por inhalación, táctica que lleva la droga directamente a los tejidos infectados y reduce al mínimo su absorción y, por tanto, sus efectos tóxicos.

Interferones

La terapia antivírica no sólo ha progresado mediante la búsqueda de drogas que inhiban la replicación del virus, sino también por apropiación de una de las defensas del cuerpo: los interferones. El término se acuñó a finales de los años 1950, cuando se encontró que las células expuestas a un virus secretaban ciertas proteínas (los interferones) que permitían a otras células resistir la infección. Los avances registrados en biología molecular han ayudado tanto a introducir el uso clínico de los interferones como a desarrollar drogas antivíricas sintéticas.

A finales de la década de 1970 se logró su purificación, abriéndose con ello el camino al estudio detallado de las actividades que desarrollan. Las células producen interferones cuando se exponen directamente al virus, pero también cuando encuentran un ARN bicatenario (una forma de material genético que se encuentra en muchos virus) o ciertos compuestos que estimulan la respuesta inmunitaria. Las moléculas de interferón secretadas se unen a receptores superficiales de otras células (las denominadas células diana), instándose en éstas la síntesis de varias proteínas nuevas.

Una de las proteínas inicia una serie de pasos bioquímicos que conducen a la activación de una enzima, hasta entonces en estado latente, que degrada el ARNm del virus que se está replicando en la célula diana. Otra, una quinasa, inactiva la maquinaria celular de síntesis de proteínas. A través de uno de esos mecanismos, o de ambos (según la clase de célula y de virus que la haya infectado), se impide que el virus exprese sus genes en proteínas. En ciertas infecciones los interferones ejercen además otros efectos, que no han recibido aún explicación en el nivel molecular. En micrografías electrónicas de algunas células estimuladas por interferón se advierte la formación de virus defectuosos, señal de que los interferones podrían inhibir el ensamblaje y la liberación de nuevas partículas víricas.

Las perspectivas terapéuticas apuntadas por los interferones no podían ensayarse hasta disponerse de ellos en grandes cantidades. Varios años después de la primera purificación de las proteínas, las técnicas de ADN recombinante permitieron clonar genes de interferón humano e insertarlos en células bacterianas y de levadura. Las bacterias, o las células de levadura, modificadas genéticamente produjeron interferones humanos en cantidades virtualmente ilimitadas [véase "Purificación y fabricación de interferones humanos", por Sidney Pestka; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1983].

Los estudios clínicos subsiguientes apuntaron que el interferón podría servir para prevenir o tratar ciertas infecciones de virus herpéticos, y tal vez también para tratar algunas verrugas causadas por virus papiloma. En pacientes de hepatitis *B* crónica o con infecciones respiratorias causadas por virus, la utilidad de los interferones no está clara. Debido a los resultados, poco concluyentes, de muchos ensayos clínicos y a la gran variedad de efectos colaterales que han mostrado, los interferones permanecen en cierto modo en un limbo clínico, pues su valor como agentes antivíricos es todavía incierto.

El reto actual: SIDA

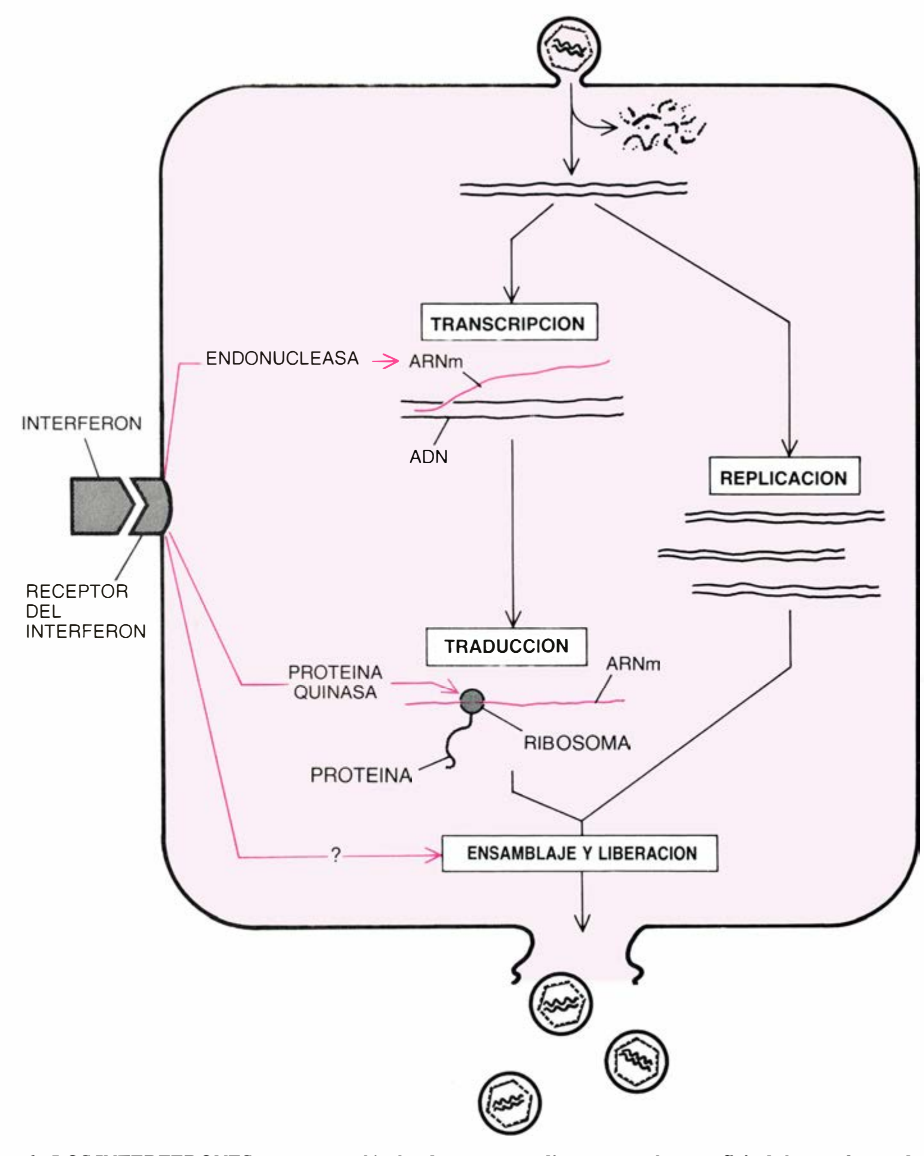
A pesar de lo que se ha progresado con el desarrollo de drogas antivíricas y de su administración en el sitio de infección con el mínimo de efectos tóxicos secundarios, la terapia antivírica está todavía en su infancia. Algunas enfermedades víricas, como la rabia e infecciones del cerebro causadas por arbovirus, se muestran intratables. Escaso ha sido el progreso contra otras infecciones del tipo del catarro común y las diarreas víricas. El mayor desafío al que se enfrenta la terapia antivírica en

su desarrollo hacia una ciencia madura es la urgente necesidad de disponer de tratamiento, de eficacia duradera, contra el SIDA.

Descrito hace apenas seis años, su virus causante, el HIV, no se identificó hasta 1983 [véase "El virus del SIDA", por Robert C. Gallo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1983]. La enfermedad se ha extendido a un ritmo aterrador, habiéndose diagnosticado ya, en Occidente, a decenas de miles de personas; el número de infectados que todavía no han desarrollado síntomas es mucho mayor, superior al millón. Varias de las características del SIDA dificultan su terapia. El objetivo principal del virus son los linfocitos *T*4, los glóbulos blancos que dirigen y gobiernan las defensas inmunitarias. La desaparición de las células *T*4 en los enfermos de SIDA provoca una grave depresión de la respuesta inmunitaria; toda droga que luche contra el SIDA deberá hacerlo sin recibir apenas ayuda por parte del sistema inmunitario del hospedador. Además, el virus infecta también células del sistema nervioso central, donde la barrera hematoencefálica le cobija y protege de muchas drogas que quizá resultaran eficaces.

Empero, empieza a desarrollarse la infraestructura de una estrategia antivírica contra el SIDA, es decir, empieza a conocerse en detalle el ciclo de replicación del virus. Al infectar sus células hospedadoras, el virus de inmunodeficiencia humana se une a moléculas específicas, receptores dispuestos en la superficie de la célula. Penetra luego en el citoplasma celular y se libera de su cápside proteica, dejando al descubierto su material genético: un filamento monocatenario de ARN. Una de las enzimas del virus, la denominada transcriptasa inversa, acompaña al ARN y, en un proceso característico de los retrovirus, la clase de virus a la que pertenece el HIV, esa enzima "retrotranscribe" el ARN en ADN. Finalmente, algunas de las copias del genoma del HIV se integran en los cromosomas de la célula hospedadora.

El genoma vírico integrado, o provirus, puede mantenerse latente hasta que la célula recibe cierto estímulo, probablemente otra infección. Entonces, el ADN provírico se transcribe a ARNm que dirige la síntesis de proteínas víricas. El provirus genera también otras copias de ARN, que constituirán el material genético para la prole del virus. Las proteínas y el ARN genómico se congregan en la membrana de la célula y se ensamblan en nuevas partículas de HIV, que abandonan la célula por gemación. Dos genes del HIV, los denominados *tat* y *trs/art*, parecen orquestar ese estallido de la replicación que destruye la célula. Determinan las pequeñas proteínas que promueven la transcripción de ADN provírico y la síntesis de proteínas víricas.



6. LOS INTERFERONES se unen a moléculas de receptores dispuestos en la superficie de la membrana de la célula infectada (*izquierda*), pudiendo ejercer luego su efecto antivírico en varios puntos del ciclo de replicación del virus. Uno es la transcripción del ADN vírico, proceso mediante el cual la información genética del virus se copia en ARN mensajero (ARNm). Los interferones pueden desencadenar procesos bioquímicos que activan una endonucleasa, una enzima que degrada el ARNm vírico. Otra posible diana de los interferones es la traducción, la producción de proteínas a partir de un molde de ARNm, que tiene lugar en los orgánulos denominados ribosomas. Los interferones pueden instar a la célula a que fabrique una proteína quinasa, que inactiva un factor que participa en la traducción. Un tercer blanco puede ser el paso final de la replicación del virus: el ensamblaje de nuevas partículas de virus a partir de nuevas proteínas y material genético replicados y la liberación de las partículas. Se ignoran los mecanismos mediante los cuales los interferones bloquean el ensamblaje y liberación del virus. (Los dibujos son obra de Thomas C. Moore.)

Azidotimidina

En el ciclo de replicación del HIV, el blanco contra el que más atrae dirigir una droga es la transcripción inversa, paso que resulta crucial para la replicación del virus e irrelevante para las células hospedadoras. Se ha visto ya que varias drogas reducen la actividad de la transcriptasa inversa *in vitro*: se comprueba que la replicación del HIV es más lenta en presencia de esos compuestos, entre los que figuran la suramina (un agente antiparasitario), el antimoniotungstato (también llamado HPA-23), el fosfomonoformato y una clase nueva de análogos de nucleósidos denominados didesoxinucleótidos. Todos ellos se están sometiendo actualmente a ensayos clínicos en pacientes de SIDA u otras dolencias afines.

Otro inhibidor de la transcripción inversa, la azidotimidina (AZT), ha demostrado ya su eficacia clínica. Igual que el aciclovir, la AZT es un análogo de nucleósido –sigue el modelo de un nucleósido de timidina– obtenido en aquel esfuerzo investigador de la década de 1960 en busca de agentes anti-

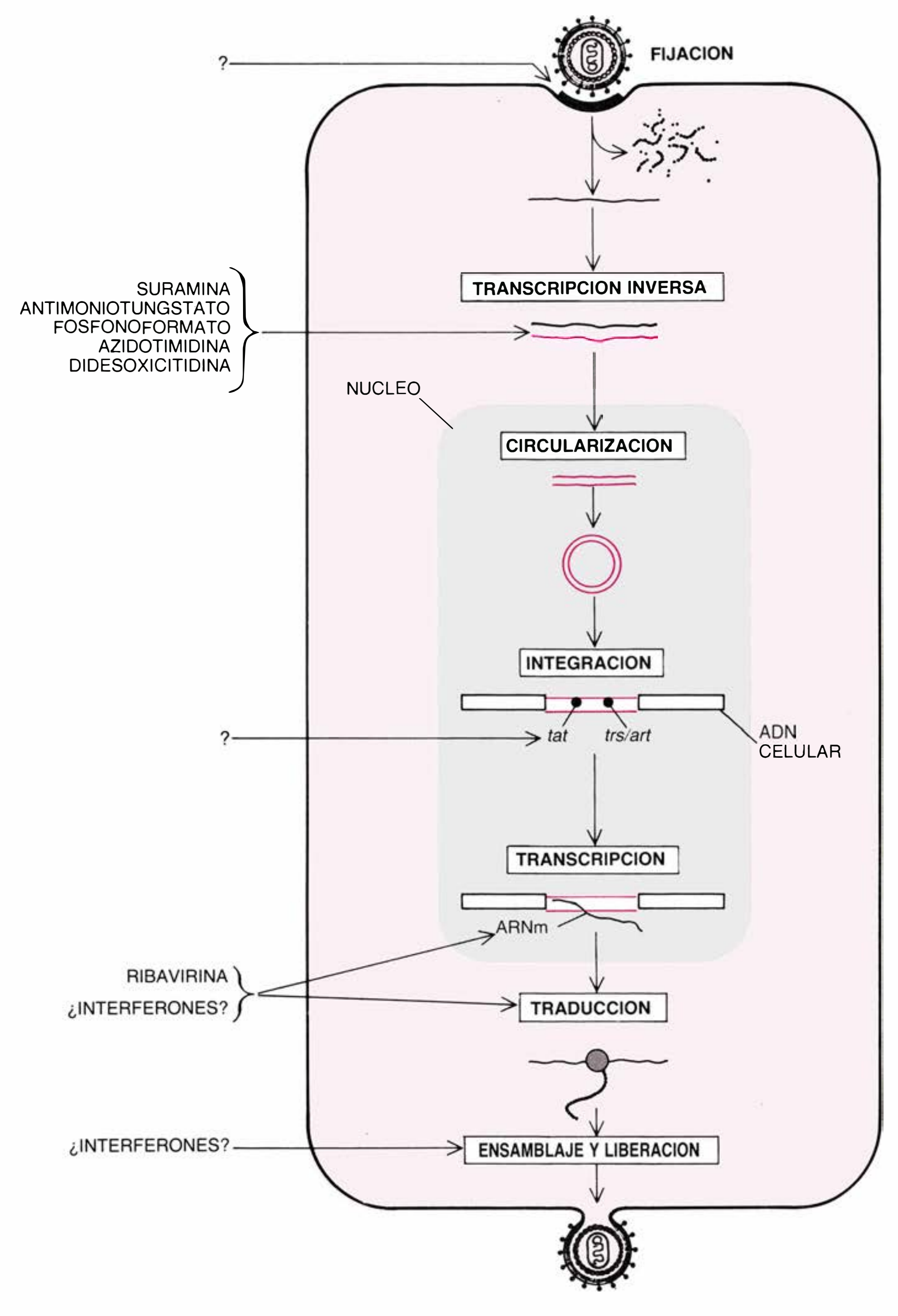
cancerígenos. La AZT interfiere la síntesis de nuevo ADN durante la transcripción inversa: provoca la detención del crecimiento de la cadena de ADN. Una triple fosforilación por las quinasas de la célula activa el compuesto, que luego se une a la transcriptasa inversa (por la cual muestra una afinidad 100 veces mayor que por las ADN polimerasas de la célula) y se incorpora a la cadena de ADN. En la posición 3′ del anillo de azúcar, la AZT posee un grupo azido (N_3) en lugar de un grupo hidroxilo. Los nucleótidos siguientes no encuentran punto de fijación y, por tanto, cesa la transcripción inversa.

In vitro, los efectos antivíricos de la AZT son selectivos y potentes: la concentración a la que inhibe la replicación del virus está muy por debajo del nivel al que, por ejemplo, empiezan a alterarse las funciones inmunitarias de las células *T*. A la luz de los alentadores resultados obtenidos en pruebas de laboratorio, un grupo de investigadores, encabezados por Samuel Broder, realizó los primeros ensayos en 1985-86, en el Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos. Los investigadores estudiaron la farmacocinética y seguridad del compuesto en un pequeño grupo de pacientes afectados de SIDA o del conjunto de síntomas denominado complejo relacionado con el SIDA (ARC). Seguidamente comenzó, con 282 enfermos de SIDA O ARC, un programa de ensayos en el que se empleó como control un placebo y cuya duración prescrita era de seis meses.

Al cumplirse 16 semanas del estudio, una comisión independiente de revisión encontró notables diferencias en la tasa de mortalidad entre los pacientes que estaban recibiendo un placebo y aquellos que recibían la droga; además, estos últimos habían sufrido menos infecciones, habían ganado peso y presentaban una mejoría en la función inmunitaria. En consecuencia, se detuvo los ensayos y a los pacientes que estaban recibiendo el placebo se les administró AZT. Sin embargo, debe conocerse mejor la droga antes de que se autorice su prescripción a gran escala. Se ignora la duración de sus efectos y si resultará eficaz en los pacientes que se encuentran en las etapas iniciales de la infección. Los proyectos de una utilización a largo plazo deben también tener en cuenta la considerable toxicidad de la AZT para las células de la médula ósea, las precursoras de las células de la sangre.

Puede que constituyan también dianas aprovechables otros pasos del ciclo de replicación del HIV. Se está sometiendo a ensayo el interferón alfa humano que, como los demás interferones, puede inhibir la producción de ARNm vírico, la síntesis de proteínas víricas o el ensamblaje y liberación de nuevas partículas y retrasa la replicación del HIV *in vitro*. Se ha probado también en pacientes la ribavirina, que afecta a la síntesis de proteínas, así como a otros acontecimientos del ciclo de replicación del virus; existen indicios de que puede retrasar o prevenir el desarrollo del SIDA en personas infectadas que no muestran síntomas.

Cabe imaginar también agentes antivíricos capaces de interferir el primer paso de la infección, es decir, la fijación de una partícula de HIV en moléculas específicas receptoras situadas



7. DIANAS MOLECULARES de las drogas, existentes e hipotéticas, para luchar contra el SIDA; actúan sobre diversos puntos del ciclo de replicación del HIV, el virus causante de esa enfermedad. El virus infecta a la célula hospedadora uniéndose a moléculas específicas de la superficie de la membrana; una droga antivírica podría bloquear esa unión. Ya dentro de la célula, el virus se deshace de su cubierta de proteína y transforma en ADN su material genético, que es de ARN, mediante el proceso conocido por transcripción inversa, que constituye la diana de fármacos ya en uso o sometidos a estudio. Seguidamente el ADN penetra en el núcleo de la célula y adopta forma de anillo; parte de él se incorpora a los cromosomas de la célula. El ADN integrado se transcribe posteriormente a ARNm, que se traduce a proteínas víricas. Los genes denominados *tat* y *trs/art* especifican proteínas que estimulan la transcripción y la traducción y que podrían servir de blanco para futuras drogas. Una de las drogas en uso, la ribavirina, interfiere la transcripción y la posterior elaboración del ARNm. Los interferones también pueden inhibir la transcripción y, tal vez, la traducción y el último acontecimiento del ciclo, es decir, el ensamblaje y la liberación de nuevas partículas de HIV.

en la superficie de la célula, o bien agentes que puedan atacar a las proteínas producto de los genes *tat* y *trs/art*, obstaculizando de ese modo la expresión de otros genes de HIV. Tales agentes (por el momento en gran parte hipotéticos) resultarían ser exquisitamente específicos y, por tanto, menos tóxicos que las drogas antivíricas contra el SIDA actualmente en desarrollo.

Estrategias antivíricas futuras

La rápida aparición de prometedores tratamientos para el SIDA testimonia el avance registrado por el conocimiento, en el nivel molecular, de la replicación de los virus y de los resultados de dos décadas de experiencia clínica con otras drogas antivíricas. ¿Cómo avanzará la terapia contra los virus en los años venideros? Sin duda, gran parte de los progresos se deberá a la mejor utilización de las drogas que ya se conocen. Los sistemas analíticos que faciliten un diagnóstico precoz de las infecciones víricas permitirán al médico iniciar el tratamiento con la droga antes de la extensión de las lesiones celulares. Nuevas técnicas de administración de drogas a tejidos que hoy resultan de difícil acceso, como el sistema nervioso central, harán posible abordar el tratamiento de otras enfermedades.

En el SIDA, y en el caso de otras enfermedades víricas graves y prolongadas, la terapia antivírica podría apoyarse cada vez más en asociaciones de drogas, cada una de las cuales atacaría una función vírica distinta. El sinergismo antivírico sería una de las posibles ventajas de tal estrategia. Nuestro grupo, por ejemplo, ha demostrado que la asociación de un inhibidor de la transcriptasa inversa, como la AZT o el fosfomonoformato, con interferón alfa, ejerce, *in vitro*, un efecto sinérgico sobre el HIV.

Se está ensayando ya en pacientes ese tipo de asociaciones, y cabe esperar beneficios adicionales. Dado que la dosis de los diversos compuestos es más baja, también lo son los efectos colaterales. La probabilidad de que surja una cepa de virus resistente es también mucho menor: el virus tendría que desarrollar mecanismos para hacer frente a varias drogas a la vez. Ventajas similares se obtendrían de un régimen en el que se administrasen dos o más compuestos de manera sucesiva en lugar de juntos. En el SIDA, la terapia de asociación podría consistir no sólo en la prescripción de diversas drogas antivíricas, sino en administrarlas junto con proteínas reguladoras de la inmunidad, con las que se intentaría restaurar las respuestas inmunitarias del paciente.

El diseño de una asociación sinérgica de agentes antivíricos, como la identificación previa de un compuesto prometedor, exige prestar mucha atención a los mecanismos moleculares de la droga. En asociación, algunas drogas pueden ejercer efectos antagónicos. Markus Vogt, de nuestro laboratorio, ha demostrado, por ejemplo, que la ribavirina tiene afinidad por las mismas enzimas celulares que fosforilan y activan la AZT. *In vitro*, la AZT pierde gran parte de su eficacia cuando se asocia con ribavirina. Por consiguiente, los ensayos clínicos de esa mezcla de fármacos deben abordarse con mucha cautela y realizarse bajo condiciones controladas.

No cabe duda de que los estudios moleculares de los ciclos de replicación vírica y de los mecanismos de las drogas experimentales seguirán constituyendo la principal fuente de progreso. A medida que se identifique la vulnerabilidad molecular de otros virus, algunas enfermedades actualmente intratables irán cediendo a la acción de drogas altamente específicas. El estudio, en el nivel molecular, de los virus latentes puede fomentar, incluso, la aparición de drogas suficientemente selectivas para atacar las secuencias de ADN vírico silenciosas, y que sólo se distinguen del material genético del hospedador por su origen.

En el estudio de los virus por cristalografía de rayos X, que permite visualizar su estructura en el nivel atómico [véase "Estructura de los poliovirus", por James M. Hogle, Marie Chow y David J. Filman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1987], puede apoyarse una estrategia para el futuro desarrollo de drogas. Los programas de gráficos por ordenador que explotaran ese tipo de información estructural proporcionarían modelos con los que predecir cómo y por dónde se unirá un compuesto experimental a una partícula de virus; tal información guiaría también las modificaciones químicas a realizar en el compuesto original o la síntesis de uno nuevo, para obtener una molécula que se ajuste con precisión a un nicho particular de la arquitectura del virus. La droga diseñada de ese modo se uniría al virus con elevada especificidad, impidiendo su fijación a la célula hospedadora o que liberara su cubierta de proteína. Tal estrategia para el diseño racional de fármacos incrementaría poderosamente los actuales enfoques utilizados en terapia antivírica.

Energía fotovoltaica

La técnica de la conversión directa de la energía solar en electricidad ha conocido grandes avances. De ahora a 15 años entrarán en servicio centrales generadoras de un millón de watt, basadas en las células solares

Yoshihiro Hamakawa

Puede afirmarse, con toda certeza, que la demanda mundial de energía proseguirá en su línea ascendente en el curso de las próximas décadas. Se puede también asegurar, si bien con menos firmeza, debido a variables tecnológicas, que los proveedores de productos energéticos tendrán que enfrentarse con la escasez de combustibles fósiles, con la atención a los efectos contaminantes de tales combustibles y con los posibles peligros de la energía nuclear. Es evidente que se podría hallar un uso para una fuente energética basada en un combustible inagotable y no contaminante. Actualmente podemos contar ya con tal fuente en la célula solar, que convierte la luz del sol en electricidad.

No se trata de ninguna técnica nueva. Las células solares han venido suministrando electricidad a los vehículos espaciales desde el advenimiento de la era espacial y han entrado en la composición de calculadoras, relojes y otros artículos de consumo. Lo realmente nuevo es que la técnica está aproximándose a la fase en que se podrán construir plantas generadoras de un millón de watt. Este progeso se apoya en las mejoras conseguidas en el rendimiento de las células solares para convertir la luz del sol en electricidad y de las reducciones en el coste de su fabricación. Como resultado, el coste de la energía fotovoltaica ha caído de 50 dólares a menos de 5 por watt durante la última década. Con los avances que son de esperar, parece probable que, para finales de siglo, podremos contar con grandes plantas generadoras basadas en células solares.

El dispositivo en el que se fundamenta esta tecnología se conoce por célula fotovoltaica. Hasta ahora, todas las células de este tipo se han fabricado con silicio cristalino, aunque otros materiales apuntan ahora como posibles y prometedores. Abarcan semiconductores hechos de aleaciones tales como el diseleniuro de indio y cobre, el telururo de cadmio y el arseniuro de galio.

No obstante, sea cual sea el material, las etapas por las cuales la célula convierte la luz solar en electricidad son esencialmente las mismas. El interés se centra ahora en el movimiento de los portadores de carga en un semiconductor, dado que la electricidad –una corriente eléctrica– consiste en un flujo de dichos portadores de carga a través de un circuito. El proceso puede estudiarse en una célula solar fabricada con silicio cristalino.

El átomo de silicio tiene normalmente 14 electrones asociados a él. Cuatro de éstos son electrones de valencia, lo que significa que pueden reaccionar con otros átomos de silicio o con los átomos de otros elementos. En un cristal de silicio puro, cada átomo está en valencia con otros cuatro átomos: comparte dos electrones con cada uno de ellos. Uno de los electrones es el suyo propio, mientras que el otro pertenece a su vecino inmediato.

Esta unión electrostática relativamente fuerte entre un electrón y los dos átomos a los que ayuda a mantenerse juntos puede deshacerse por una absorción de energía. Por medio de una aportación apropiada de energía, el electrón se eleva a un nivel energético denominado banda de conducción, en la que puede moverse con libertad y participar en la conducción de electricidad. Al efectuar tal cambio, deja tras de sí un "hueco", que es el lugar en el que falta un electrón. Cabe esperar que un electrón próximo pase a ocupar el hueco, intercambiando sus posiciones respectivas. De aquí que tanto electrones como huecos puedan moverse dentro del cristal.

La célula solar es fundamentalmente un diodo de gran superficie. En el diodo, el paso de corriente, en forma de portadores de carga libre, así los electrones, queda impedido en una dirección, mientras que se facilita en la otra. Este resultado se consigue por la presencia de un campo eléctrico fijo en el diodo, resultante de que el diodo esté fabricado con dos semiconductores de materiales diferentes. Dicho campo eléctrico impulsará a los portadores de una carga determinada a través del mismo y repelerá a los portadores de la carga opuesta.

La célula solar aprovecha este fenómeno. La célula consta de dos capas semiconductoras diferentes para crear un campo similar al de un diodo y fijarlo dentro de la célula. Este campo eléctrico incorporado se coloca inmediato, en lo posible, a la región donde el dispositivo absorbe la luz solar. Esta aporta energía (unos 1000 watt por metro cuadrado de superficie expuesta). Cuando los fotones solares llegan al semiconductor de una célula solar, pueden reflejarse, atravesarlo o ser absorbidos. Los fotones absorbidos son los potencialmente utilizables.

El fotón absorbido en un semiconductor puede producir calor al empujar el material semiconductor, o puede poseer suficiente energía para liberar un electrón, que hasta entonces se hallaba ligado, y elevarlo a un estado libre en la banda de conducción del material. Por ejemplo, un fotón de una longitud de onda inferior a unos 1,2 micrometros posee energía suficiente para producir un electrón libre cuando se absorbe en el silicio.

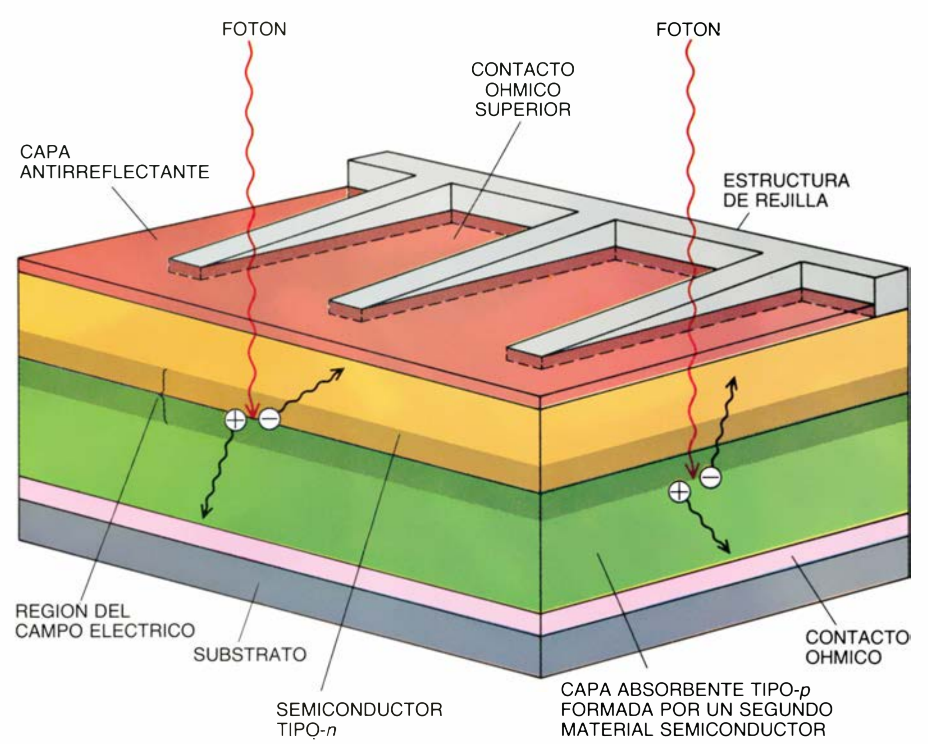
El ascenso o promoción de un electrón hasta la banda de conducción crea un hueco. Este hueco representa una carga libre positiva que actúa de forma análoga, aunque inversa, a una carga



1. TEJAS fabricadas con células solares de silicio amorfo; estas nuevas instalaciones, que pueden sustituir a los tejados tradicionales, permiten dotar al edificio de un suministro de electricidad generada por el Sol. Las tejas de la fotografía fueron fabricadas por la empresa japonesa Sanyo Electric Co., Ltd.



2. CASA EQUIPADA CON PANELES COLECTORES de energía solar. Lleva funcionando cinco años en Osaka, Japón. Los paneles azules del tejado, que son células solares fabricadas con silicio amorfo, suministran la electricidad; los paneles rojos que cuelgan del tejado proporcionan calefacción y refrigeración.



3. CELULA SOLAR basada en el silicio cristalino; consta de varias capas. De abajo arriba, éstas son un substrato de vidrio o plástico, una capa metálica que sirve de contacto en el circuito eléctrico externo, un semiconductor de silicio de tipo *p* que tiende a captar "huecos", o partículas portadoras de carga positiva, una capa de silicio de tipo *n*, fabricada de forma diferente, para captar electrones de carga negativa, una capa antirreflectante y una rejilla colectora como contacto superior. Los símbolos (+) y (−) representan un par electrón-hueco creado por la absorción de un fotón solar o cuanto de luz. Cerca de la unión *p-n*, un campo eléctrico resultante de los diferentes materiales de los semiconductores empuja los electrones hacia arriba y los huecos hacia abajo. Este flujo de carga produce una corriente eléctrica a lo largo del circuito externo.

libre negativa. Si el semiconductor de silicio contiene un hueco, éste se moverá con entera libertad, ya que un electrón ligado próximo puede fácilmente saltar y ocupar la posición del hueco, trasladando el hueco al lugar que dejó vacante el electrón.

Cuando un semiconductor absorbe luz, produce dos portadores libres: el electrón libre en la banda de conducción y el hueco libre en la banda de valencia. El proceso clave para la conversión, por la célula solar, de la luz en electricidad consiste en que estos portadores libres generados por la luz se ven después impulsados en direcciones opuestas por la fuerza del campo eléctrico incorporado. Los huecos y los electrones próximos al campo nos proporcionan un ejemplo. Supongamos que el campo apunta en una dirección tal (en relación con estos portadores generados por la luz) que facilita el paso de electrones y repele los huecos. Los electrones se acelerarán a través del campo, mientras que los huecos permanecerán cerca del lugar donde se generaron. Una vez que los electrones libres han pasado por el campo eléctrico ya no volverán, debido a que el campo, actuando como lo hace un campo de diodo, les impedirá hacerlo.

De aquí que, en la medida en que la luz incide sobre la célula, un número creciente de cargas positivas se impulsen hacia la parte superior de la célula y las negativas hacia la parte inferior, o viceversa, dependiendo del tipo de la célula. Si a dichas partes superior e inferior se une un conductor, las cargas libres constituirán un flujo eléctrico. La electricidad fluirá continuamente, como corriente directa, durante todo el tiempo que la célula permanezca expuesta a la luz.

En una célula solar típica, el vidrio, plástico u otro material semejante forman el substrato de la célula. Sobre éste se deposita una capa conductora, por ejemplo, un metal, convirtiéndose en el contacto posterior. A continuación se deposita el semiconductor que absorbe luz. Superpónese a éste un semiconductor diferente o modificado. La unión o interfase entre ambos semiconductores es el punto donde se halla el campo crítico incorporado. El semiconductor superior suele ser transparente, para permitir el paso de luz y que ésta se absorba lo más próximo posible al campo eléctrico. Esta disposición mejora la probabilidad de que los electrones o huecos generados por la luz lleguen a la región del campo y se separen.

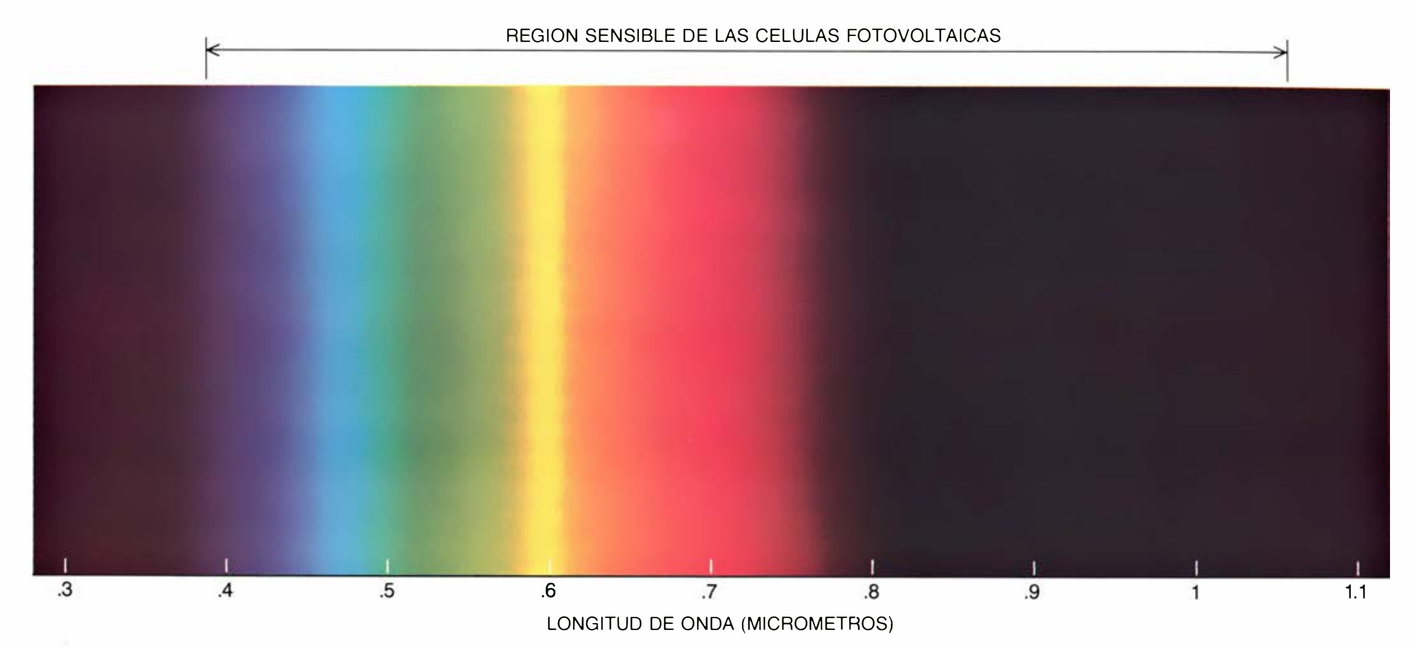
El componente final de una célula típica es la rejilla superior de contacto. Cuando los contactos superior e inferior se hallen conectados formando un circuito, la electricidad fluirá mientras la célula esté iluminada.

Para una mejor comprensión del funcionamiento de una célula solar bien diseñada, son de interés otros varios fenómenos. Dos procesos, deriva y difusión, influyen en la efectividad con la que los portadores libres generados por la luz contribuyen al flujo de corriente. La luz absorbida en la célula puede generar los portadores libres,

a EFECTO FOTOCONDUCTIVO
FOTON
ATOMO DE SILICIO
FOTON
HUECO
ELECTRON LIBERADO
HUECO

b EFECTO FOTOVOLTAICO
BANDA DE CONDUCCION
LUZ (AZUL)
LUZ (ROJA)
BANDA PROHIBIDA
SEPARACION DE BANDA
BANDA DE VALENCIA

4. EFECTO FOTOVOLTAICO de los fotones sobre un cristal de silicio (*a*); se produce cuando un fotón entrante colisiona con un electrón (*puntos negros*) ligado a un átomo de silicio. El electrón se libera y se convierte en una carga libre negativa, dejando en su lugar un hueco positivo. Este fenómeno constituye el efecto fotoconductor. De acuerdo con la mecánica cuántica (*b*), los electrones liberados por fotones de energía adquieren más energía y se pasan de la banda de valencia, o estado ligado, a la banda de conducción. Si el efecto fotoconductor se produce cerca del campo eléctrico de una célula, el par electrón-hueco se separa y sus integrantes se mueven hacia lados opuestos de la célula. Pueden participar en una corriente eléctrica.



5. REGION DE RESPUESTA de las células fotovoltaicas de silicio cristalino. Esa zona comienza dentro de la parte violeta del espectro visible (alrededor de los 0,35 micrometros en longitud de onda) y va más allá del espectro visible, hasta el infrarrojo. El máximo de la energía solar se sitúa entre 0,5 y 0,55 μm.

bien en la región de campo estrecha, bien fuera de ella. Los portadores generados en esa región, que tiene generalmente una anchura de 0,5 micrometros, quedan bien separados por la potencia del campo y se impulsan a alta velocidad hacia las partes superior e inferior de la célula. Este es el proceso de deriva.

La difusión se aplica a los portadores libres generados fuera de la región del campo. Ellos nos remiten a su tendencia a moverse aleatoriamente durante cierto tiempo. Cualquier electrón libre tiene cierta probabilidad de encontrar el campo eléctrico incorporado. Si lo hace, se verá impulsado hacia el otro lado de la célula y podrá contribuir a la corriente eléctrica. Las células solares de alto rendimiento se han diseñado para que optimicen esa probabilidad.

El espesor de una célula solar y, en gran medida, su coste en materiales y en procesado, queda determinado por su habilidad para absorber la luz solar disponible. Dos factores críticos, el intervalo de banda y el coeficiente de absorción, influyen sobre la absorción de luz. El intervalo de banda de un semiconductor es el nivel energético característico al que comienza a absorber luz solar. El silicio, el arseniuro de galio y otros materiales empleados en las células solares resultan adecuados porque inician la absorción de luz a largas longitudes de onda. De aquí que puedan absorber una gran fracción de la luz solar disponible.

Por otro lado, los distintos materiales semiconductores absorben mejor la luz solar de acuerdo con su propio espesor, que puede variar de 100 micrometros a menos de un micrometro. Las llamadas células solares de capa fina están hechas de materiales que absorben en el rango de un micrometro, permitiendo así grandes reducciones en material y en costes de fabricación. (Se requieren unos 50 micrometros de silicio cristalino para absorber tanta luz solar como puede absorber el silicio amorfo en un micrometro, y lo que el diseleniuro de indio y cobre puede absorber en 0,1 micrometros.)

Las variaciones en absorción se deben a diferencias en la estructura atómica de los distintos materiales semiconductores. Algunos, los denominados materiales de intervalo de banda directa, son altamente absorbentes; otros (los materiales de intervalo indirecto) sólo son débilmente absorbentes. El silicio cristalino es un material de intervalo de banda indirecto; los materiales de capa fina, tales como el silicio amorfo y el diseleniuro de indio y cobre, son materiales de intervalo de banda directo. En los de tipo indirecto se requieren dos fenómenos coincidentes para que un electrón de valencia pase a la banda de conducción: la absorción de luz propiamente dicha y la interacción favorable con una vibración de la red (denominada fonón). En los materiales de intervalo de banda directo, la sola absorción de energía solar es suficiente. La diferencia de probabilidad entre el suceso simple y el suceso doble da cuenta del orden de magnitud de la diferencia en la absorción de luz por los materiales.

Al trabajar con células solares, la cantidad de luz solar que llega a la Tierra debe también tenerse en cuenta. Por encima mismo de la atmósfera, la llamada constante solar es de 1358 watt por metro cuadrado. Para cuando la luz solar llega al nivel del mar, la absorción de energía solar por el vapor de agua, el ozono (O_3) y dióxido de carbono han reducido dicha cantidad a unos 1000 watt por metro cuadrado. Sobre la superficie de la Tierra, esta energía solar se distribuye principalmente en un rango de longitudes de onda que van de los 0,4 micrometros hasta los 2,5 micrometros; la energía alcanza su máximo entre 0,5 y 0,55 micrometros, que es aproximadamente la longitud de onda del color verde de las hojas.

El rendimiento de una célula solar queda determinado por el espectro energético de la absorción óptica en el área activa del semiconductor y por la profundidad de la unión *p-n* (la interfase entre la capa que tiende a recoger las cargas positivas, o huecos, y la capa que tiene tendencia a recoger las cargas negativas, o electrones) medida en el lado de la célula que se encara al Sol. Un ejemplo del tipo de eficiencia que cabe esperar de una célula solar se ve en la célula de silicio cristalino. Tal célula es sensible a la luz en un rango que abarca desde los 0,35 micrometros hasta los 1,1 micrometros; cubre casi todo el espectro visible y se extiende hasta el infrarrojo. Debido a pérdidas causadas por factores tales como el calor, la reflexión y los fotones que no son absorbidos por el semiconductor, el límite teórico de la eficiencia de una célula de silicio para convertir luz solar en electricidad se cifra en

torno al 28 por ciento. Pérdidas adicionales en la célula significan que su eficiencia real queda un poco alejada de la máxima teórica.

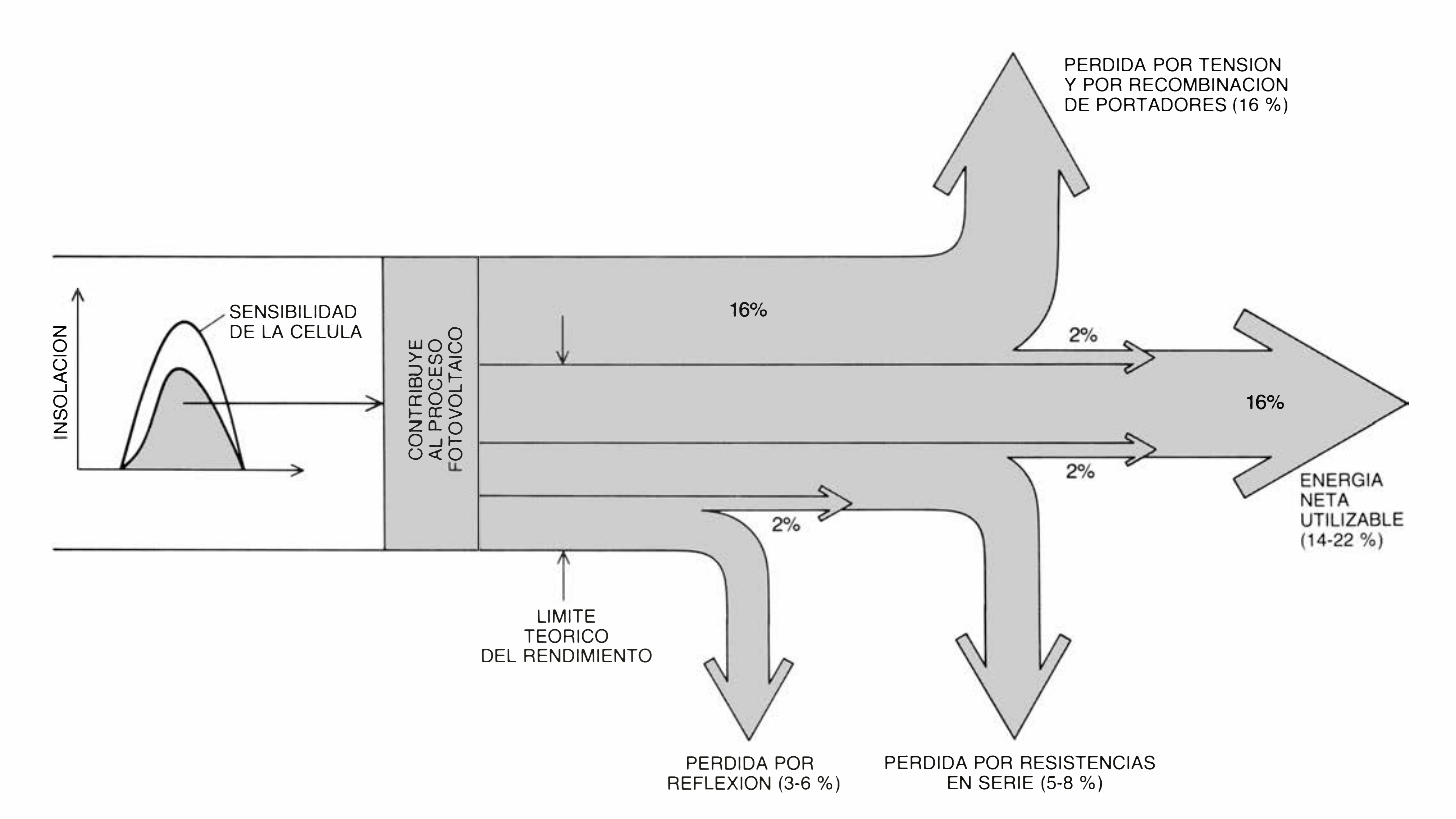
Se señala frecuentemente que la eficiencia de conversión de la célula solar es menos de la mitad de la que alcanzan los sistemas generadores basados en la energía nuclear o en las combustibles fósiles. Esta comparación carece de sentido. Con una eficiencia de conversión del 38 por ciento, una turbina de vapor alimentada con petróleo desperdicia un 62 por ciento de este costoso combustible. (En efecto, el combustible procede de procesos asociados a la luz solar mucho menos eficientes que la célula solar.) Además, la energía generada produce contaminación térmica y atmosférica y lluvia ácida. Por otra parte, aun cuando una instalación de células solares tuviera un rendimiento en la conversión de la luz solar en electricidad de sólo el 10 por ciento, estaría utilizando de manera eficaz una fuente energética que, de otro modo, quedaría sin aprovechar y que, en realidad, no cuesta nada.

Esto no quiere decir que no haya necesidad de mejorar la eficiencia de las células solares. Cualquier ganancia en rendimiento contribuye a reducir el coste de la energía producida por las instalaciones de células solares. De aquí que se esté realizando actualmente una gran labor de investigación y desarrollo para mejorar la eficacia conversora (luz solar en electricidad) de las técnicas aplicables para que produzcan más energía.

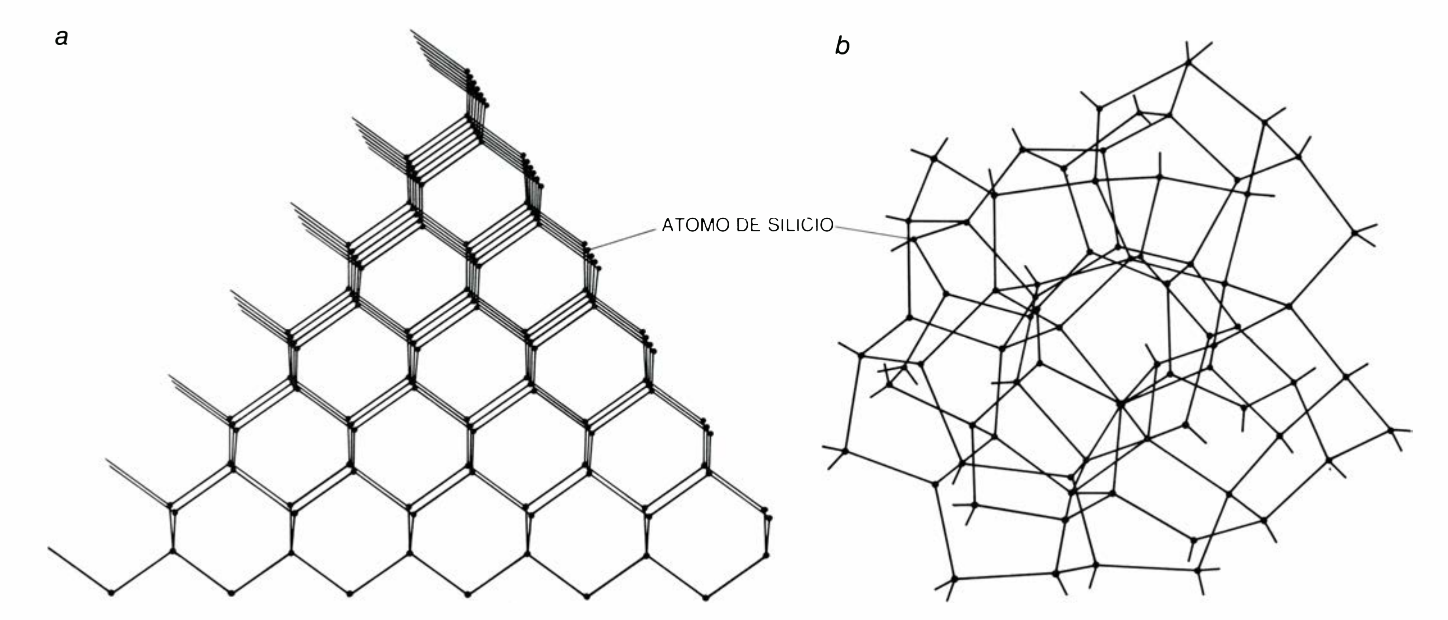
Un paso importante, si bien obvio, es la aplicación de una capa antireflectante a la superficie frontal de la célula, para así aumentar la cantidad de luz no reflejada y, con ello, el número de fotones que penetran en la unión *p-n*. Las pérdidas por reflexión de una célula no cubierta por dicha capa pueden alcanzar hasta un 30 por ciento. Otro paso en este proceso sería el de emplear la tecnología conocida como de campo de la superficie posterior, por la que se crea un campo eléctrico en la superficie posterior de un semiconductor que hace retroceder a los portadores libres en movimiento aleatorio hacia la unión *p-n*, a fin de acentuar la separación de electrones y huecos. Mediante tales esfuerzos, el rendimiento de las células solares cristalinas producidas en masa ha alcanzado ya el 14 por ciento.

En fecha reciente, se han desarrollado nuevos materiales para la producción de células fotovoltaicas. Uno de los más importantes es el silicio amorfo (a-Si), que no posee la estructura reticular regular del silicio cristalino. La estructura amorfa aumenta considerablemente la probabilidad de la absorción de luz y de salto de un electrón hasta la banda de conducción. Este material se considera, por tanto, muy superior al silicio cristalino para la absorción de luz solar. De aquí que pueda fabricarse en forma de capa fina para semiconductores (0,5 micrometros de espesor, frente a los 300 micrometros del silicio cristalino). Al contener menos material, las células de capa fina valen también menos.

Un logro conexo es la invención de un carburo de silicio amorfo (a-SiC). Con esta aleación, el fabricante puede controlar no solamente la valencia (dopando el material con impurezas para suministrar más o menos electrones), sino también el intervalo de banda –cantidad de energía incidente necesaria para elevar un electrón a la banda de conducción– a la que la célula responde (variando la cantidad de carbono). Este descubrimiento inicia la era de las aleaciones del silicio amorfo, introduciendo nuevos materiales: el germanio-silicio amorfo (a-SiGe), el nitruro de silicio amorfo (a-SiN) y otros. Tales aleaciones cambian el intervalo de banda del silicio amorfo para adaptarlo a funciones diferentes en el diseño de células de capa fina.



6. FLUJO DE ENERGIA en una célula solar de silicio cristalino. Dicho flujo emplea, en principio, un 44 por ciento de la energía solar a la que es sensible la célula. Otro 16 por ciento de la energía se pierde por diversos procesos en el interior celular, dejando un límite de rendimiento teórico del 28 por ciento. Pérdidas adicionales menguan la eficiencia real de la célula en su conversión de la luz solar en electricidad, hasta dejarla entre el 14 y el 22 por ciento. Las flechas rotuladas con el "2 por ciento" indican energía perdida; así, la ocasionada por reflexión, que puede captarse de nuevo por una célula que esté bien diseñada.



7. DIFERENCIA ESTRUCTURAL entre el silicio cristalino (*a*) y el silicio amorfo (*b*). Hasta hace poco, la mayoría de las células solares se fabricaban con silicio cristalino, que presenta la estructura reticulada típica de un cristal. La estructura amorfa, o irregular, aumenta la posibilidad de absorción de luz, debido a que los fotones interactúan más con la estructura amorfa. De aquí que una célula pueda fabricarse con menos material mediante la técnica de capa fina. El silicio amorfo es uno de los varios materiales desarrollados para células de capa fina; otros materiales son el arseniuro de galio y el telururo de cadmio.

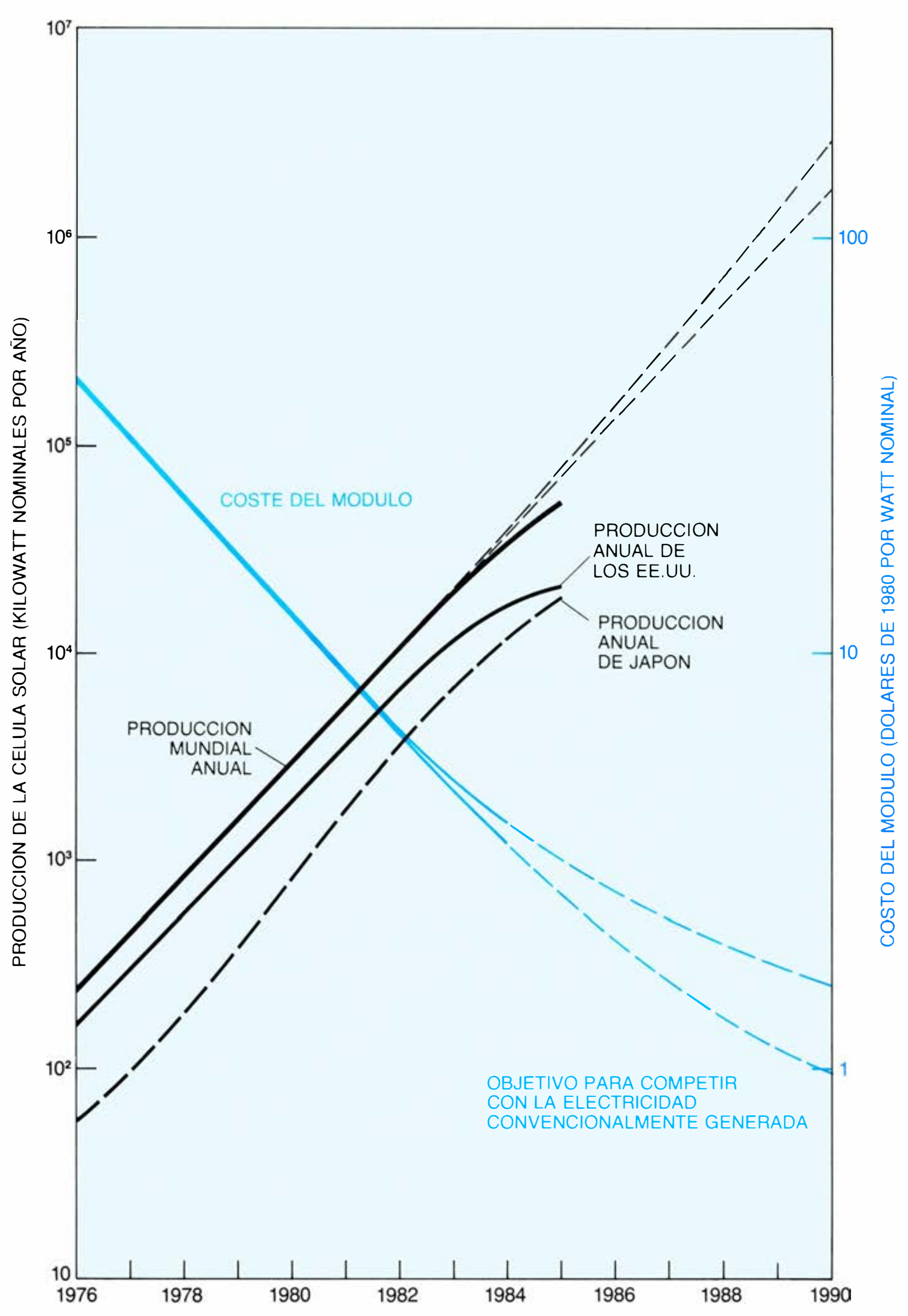
Otro avance en la técnica de la célula solar de capa fina es el de apilar las células y así conseguir un uso más completo del espectro. Por ejemplo, la célula superior podría captar la luz azul, permitiendo que la luz roja pase a otra célula que sea más eficiente en esa parte del espectro.

Un panel sellado que contenga varias células interconectadas en fábrica se denomina módulo fotovoltaico. Varios módulos forman una estructura. Para captar más eficientemente la luz solar se puede construir una estructura solar dentro de la llamada instalación plana, que se monta sobre un dispositivo diseñado para que siga la trayectoria del Sol durante las horas diurnas. Otra técnica para captar la luz solar consiste en una instalación concentradora, que emplea reflectores o lentes para enfocar la luz solar sobre las células. Estos dos tipos de instalación difieren, desde el punto de vista operativo, en que una placa plana funcionará satisfactoriamente incluso con la luz difusa de un día nublado, mientras que el sistema concentrador funciona bien sólo con luz solar directa. La desventaja que presenta la instalación concentradora puede compensarse parcialmente dotando, a la estructura, de células solares de alto rendimiento; entre éstas se cuentan las células de silicio monocristalino y las de arseniuro de galio, que poseen un índice de eficiencia comprendido entre el 20 y el 26 por ciento.

El uso de instalaciones concentradoras incide sobre la reducción del coste de las plantas generadoras por células solares. Dispositivos ópticos tales como lentes y reflectores pueden ser más baratos que las células solares, por lo que la planta que los emplee podría requerir una inversión menor en dispositivos fotovoltaicos. Además, en una instalación concentradora, la célula solar de extensión reducida en el foco de concentración no es lo que más encarece el sistema, por lo que es posible utilizar dispositivos fotovoltaicos de gran rendimiento que resultarían prohibitivos en una instalación de paneles planos.

El coste es lo que ha retrasado el desarrollo en masa de plantas generadoras basadas en la energía fotovoltaica. En 1974, el precio de un módulo de célula solar era de 50 dólares por watt de potencia máxima. El coste de la electricidad suministrada por tal módulo a través de la red de distribución sería sumamente alto: 3 dólares por kilowatt-hora, suponiendo una planta de 20 años de duración y añadiendo otros 50 dólares por watt para cubrir el coste de otros componentes del sistema. Por aquel entonces, el coste de la energía eléctrica generada por combustibles fósiles y energía nuclear era de cinco a diez centavos por kilowatt-hora. Esta enorme diferencia hizo necesario un gran esfuerzo de investigación para poder reducir el coste de la electricidad fotovoltaica. Se trabajó en los materiales para las células, la estructura de éstas y los procesos de producción en masa. Como resultado de estos esfuerzos, el coste de un módulo ha bajado en un orden de magnitud, hasta unos 5 dólares por watt. Durante la próxima década pueden esperarse quizás otras reducciones, posiblemente de otro orden de magnitud, hasta menos de 40 centavos por watt, empleando células de capa fina tales como las de silicio amorfo.

La técnica de capa fina sirve para ilustrar las posibilidades que se abren ante nosotros. Las células fabricadas de tres de los materiales de capa fina (silicio amorfo, diseleniuro de indio y cobre y telururo de cadmio) han conseguido rendimientos del 10 por ciento en laboratorio. Varias empresas de los Estados Unidos y del Japón fabrican módulos comerciales de silicio amorfo, en algunos caso de 0,093 hasta 0,371 metros cuadrados. La eficiencia de tales módulos es aproximadamente del 8 o el 9 por ciento. Otras empresas comercializan los dos materiales restantes, que igualan al silicio amorfo en lo concerniente al rendimiento a largo plazo y en el nivel de coste requerido en la tecnología de capa fina. Fabricantes de diseleniuro de indio y cobre han obtenido rendimientos de casi un 10 por ciento con módulos de 100 centímetros cuadrados de superficie. Diversas empresas que trabajan con telururo de cadmio han ensayado el método de electrodeposición para fabricar células solares a bajo coste. Algunas de estas empresas han construido módulos de telururo de cadmio de unos 0,093 metros cuadrados e incluso mayores.



8. PRODUCCION Y COSTE de las células solares. Ambas magnitudes han evolucionado en direcciones opuestas durante la pasada década, y se prevé que la tendencia continúe. Un módulo es un panel sellado que contiene varias células solares interconectadas en la propia fábrica; varios módulos forman una estructura.

El grueso del trabajo empeñado en la mejora de estos materiales para que satisfagan los requisitos de producir energía a precios competitivos se dedica a aumentar el rendimiento de los módulos hasta un 15 por ciento, desarrollar técnicas de fabricación que produzcan módulos a un costo inferior a 50 dólares por metro cuadrado y asegurar que los módulos sean duraderos y operen rentablemente durante períodos de hasta 30 años en instalaciones expuestas a la intemperie. El hecho de que los dispositivos de capa fina hayan conseguido rendimientos de conversión del 10 por ciento (partiendo desde cero, hace tan sólo una década) da cuenta de la rapidez del progreso. Varias empresas manifiestan haber conseguido rendimientos del 11 o el 12 por ciento con células de laboratorio. En última instancia, el rendimiento de las células en operación tendrá que ser del 16 o el 17 por ciento y conseguir así promedios del 15 por ciento en grandes sistemas, consideradas las pérdidas inherentes.

El progreso hacia tales rendimientos avanza con firmeza y sistemáticamente se van desarrollando nuevas estrategias (tales como el apilado de células) para lograrlos. La fabricación de superficies de grandes dimensiones parece hallarse ya próxima y, cuando los nuevos materiales se fabriquen a gran escala, se obtendrán sustanciales ahorros en el coste.

A medida que el precio de las células solares se ha ido abaratando durante los últimos diez años, han surgido nuevas aplicaciones para el uso de esa tecnología. Además de la variedad de dispositivos electrónicos alimentados por energía solar que se expenden en el mercado, se fabrican otros productos: bombas de agua y señales para la regulación del tráfico. Generadores ligeros de peso y alimentados por energía solar proporcionan electricidad a yates y vehículos terrestres. Como señaló Kenneth Zweibel, del Instituto de Investigación en Energía Solar, esta técnica debería hallar aplicaciones muy variadas en los países en vías de desarrollo.

Vayamos con el paso siguiente: la conexión de un gran sistema fotovoltaico a la red de distribución eléctrica. A fin de poner a prueba y demostrar tales posibilidades, el Departamento de Energía de los EE.UU. subvencionó, a finales de la década de los años setenta, nueve plantas intermedias, que iban de 10 a 100 kilowatt. Estas plantas demostraron satisfactoriamente la viabilidad de las centrales de capacidad intermedia y las grandes. Hasta 1984, el número de plantas fotovoltaicas de tamaño importante, construidas o en proyecto, era de 14. Varían, en su capacidad, de los 200 kilowatt a los 120 megawatt. Están ubicadas en EE.UU., Italia, Japón, Arabia Saudita y la República Federal Alemana. La Comunidad Económica Europea y algunos otros países están desarrollando 20 plantas fotovoltaicas de demostración, con capacidades comprendidas entre 15 y 300 kilowatt. Japón tiene en operación más de 10 centrales, que van de 3 a 200 kilowatt; en 1985, entró en operación una planta de un megawatt construida por la Organización para el Desarrollo de Nuevas Energías. El proyecto Sunshine de Japón, iniciado en 1974, tiene por objeto desarrollar proyectos sobre energía renovable para satisfacer gran parte de la demanda nacional de energía hacia el año 2000. El Departamento de Energía de los EE.UU. comenzó hace varios años un programa fotovoltaico similar, con iguales objetivos.

La mayor planta solar actualmente en funcionamiento se halla en Carrisa Plains, en California. Fue construida en menos de un año por las empresas

ARCO Solar y Pacific Gas & Electric Co.y suministra 7,2 megawatt de potencia máxima a la red.

Teniendo en cuenta las mejoras que cabe esperar en materiales y rendimiento, el coste de la electricidad producida por sistemas fotovoltaicos podría competir con el de las centrales tradicionales hacia 1995. En términos de coste por kilowatt-hora, las centrales tradicionales producirán electricidad a costes comprendidos entre tres centavos (centrales hidroeléctricas) y 35 centavos (turbinas de vapor a carbón). Para entonces, el kilowatt-hora producido por las plantas fotovoltaicas debería ser de unos ocho centavos. Y otros adelantos en la técnica fotovoltaica deberían permitir vender la energía eléctrica a menos de cuatro centavos por kilowatt-hora.

El sistema fotovoltaico solar ofrece varias ventajas, además de basarse en un recurso limpio e inagotable. No tiene ningún componente o pieza móvil, por lo que una central eléctrica solar puede operar sin apenas mantenimiento –fenómeno demostrado en faros telecontrolados, estaciones relé de comunicaciones y vehículos espaciales–. Las células solares pueden fabricarse en serie, al igual que los transistores y los circuitos integrados. En un mercado en expansión cabe esperar que este atributo propicie reducciones en coste resultantes de economías de escala. Las estructuras solares consisten en cierto número de módulos de células solares y permiten una amplia variedad de tipos, tamaños y aplicaciones con el mismo rendimiento en conversión y tecnología. Una central de un megawatt de capacidad puede construirse en menos de un año, lo que contrasta radicalmente con las plantas generadoras tradicionales, especialmente con las centrales nucleares. En consecuencia, las compañías de electricidad pueden disponer de mayor flexibilidad en su planificación de cambios proyectados en la demanda de energía.

A la vista de todas estas consideraciones cabe esperar que la era fotovoltaica sea económicamente viable en un próximo futuro, mucho antes de lo que nadie hubiera sospechado hace tan sólo una década. Este logro requerirá un trabajo sostenido de investigación y desarrollo, cooperación internacional y, quizá, subvenciones iniciales por parte de los gobiernos interesados. Si ayudan las circunstancias, la industria fotovoltaica podría rivalizar en tamaño con la industria electrónica.

La radiación de la vida animal

Hace unos 570 millones de años los animales se diversificaron a un ritmo sin precedentes, coordinados con una nueva clase de comunidad biológica que se caracterizaba por la existencia de cadenas alimentarias complejas

Mark A. S. McMenamin

Todavía a mediados de nuestro siglo, los fósiles más antiguos que se conocían procedían en su totalidad de formaciones geológicas pertenecientes al Cámbrico; este intervalo estratigráfico comprende rocas formadas hace de 570 a 505 millones de años. Los fósiles cámbricos correspondían a faunas con planes de organización corporal similares a los de diversos animales actuales. El registro fósil planteaba, pues, un interrogante: ¿dónde estaban las formas ancestrales que habían dado origen a estos tempranos animales marinos, tan abundantes ya, avanzados y distintos? La súbita aparición de faunas fósiles en los estratos de la base del Cámbrico, y su ausencia en los del Precámbrico, convertían el límite entre ambos períodos en la división cardinal de la escala del tiempo geológico.

Sin embargo, en los últimos años han aparecido faunas fósiles anteriores al Cámbrico en diversas áreas repartidas por todo el mundo. Lo que no cuestiona que fuera en ese período cuando se produjo una formidable explosión de vida. El comienzo del Cámbrico señala la primera manifestación de una gran cantidad de grupos importantes de animales. Muchos han sobrevivido hasta hoy. Otros, en cambio, son tan insólitos que no pueden ser asignados a ningún *phylum* conocido (llámase *phylum* al grupo de animales que comparten la misma organización corporal general). Aunque la mayor parte de los planes de organización corporal que se encuentran en los seres actuales hicieron acto de presencia durante el período Cámbrico, sólo una mínima fracción de los animales que habitaban entonces los mares han dado origen a organismos con representación en nuestros días. Con la ventaja que proporciona la visión retrospectiva, podemos afirmar que casi todos los demás pueden reputarse experimentos de corta vida. El período Cámbrico conoció la existencia de un porcentaje de tales grupos experimentales de animales mayor que en ningún otro intervalo de la historia de la Tierra.

La aparición durante el tránsito Precámbrico-Cámbrico de tantas clases de organismos transformó, de raíz, la naturaleza de las relaciones entre los animales. A lo largo del Cámbrico, numerosas criaturas evolucionaron tendiendo a ocupar nichos ecológicos hasta entonces por hollar. Proliferaron los animales que se nutrían de materia viva en vez de abastecerse de materia orgánica muerta o de depender de relaciones simbióticas con algas fotosintetizadoras. Aparecieron los depredadores. Los animales del Cámbrico coexistieron formando un entramado de relaciones no muy distinto de los que tejen los animales actuales. Por tanto, el tránsito entre el Precámbrico y el Cámbrico no solamente asistió a la aparición de muchas clases modernas de animales, sino que supo también del desarrollo del tipo actual de comunidad animal.

Podemos dividir el tránsito entre el Precámbrico y el Cámbrico en cuatro estadios principales. El primero está caracterizado por la aparición de los primeros fósiles de animales provistos de concha (en ese estadio sólo se han hallado una o dos especies de este tipo) y por la llamada fauna de Ediácara: organismos con cuerpo blando y plano, denominados así por el lugar donde se desenterraron los primeros especímenes, las colinas de Ediácara en el sur de Australia. Aproximadamente, este estadio se desarrolló en el intervalo comprendido entre 700 y 570 millones de años atrás. El segundo estadio, que comenzó hace alrededor de 570 millones de años (con un margen de error de más/menos 40 millones de años) asistió a la desaparición de la fauna de Ediácara y a la aparición de las primeras asociaciones de faunas provistas de concha con baja diversidad (asociaciones en las que se han hallado reunidas alrededor de cinco especies distintas de animales que poseían caparazón). Esta fase duró entre 5 y 15 millones de años.

El tercer estadio, con una prolongación aproximada de 10 a 20 millones de años, se caracterizó por la presencia de faunas provistas de concha con diversidad moderada (el número de especies distintas que se suelen encontrar reunidas es de más de cinco y menos de quince) y por la aparición de un insólito grupo de organismos con cuerpo en forma de cáliz: los arqueociatos. El cuarto estadio, con una duración de 15 a 30 millones de años, contempló la aparición de las primeras faunas con caparazón de alta diversidad y también la de los primeros trilobites. Los trilobites son artrópodos (animales que poseen apéndices articulados) extintos, cuyo cuerpo esta dividido en tres sectores (cefalón, tórax y pigidio) y cubierto por una coraza o exoesqueleto; al igual que los artrópodos actuales, los trilobites crecían mudando el caparazón y son los moldes fosilizados de estas mudas lo que habitualmente se recupera.

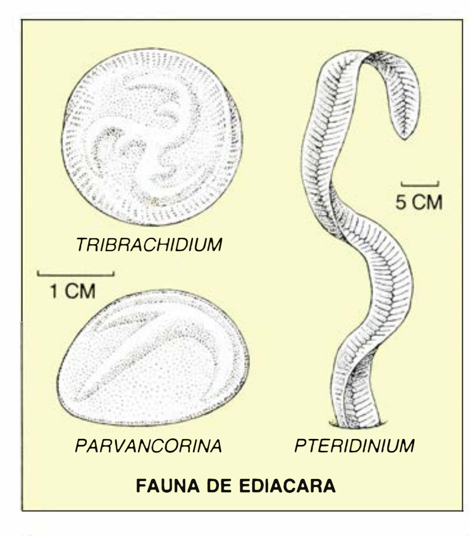
La aparición de la fauna de Ediácara, que es la que caracteriza el primero de estos cuatro estadios, acontece en estratos situados por encima de materiales del Precámbrico formados por sedimentos marinos generados por glaciares, que reciben el nombre de tilitas. Estas tilitas registran la puesta en marcha de unos episodios de glaciación que tuvieron un alcance universal. La fauna de Ediácara, por tanto, debió haberse desarrollado no mucho después de que terminase el último de los episodios mayores de la glaciación del Precámbrico superior. Se han hallado conjuntamente fósiles de animales de cuerpo blando de tipo Ediácara y trazas fósiles (huellas y excavaciones someras producidas por animales) hendidas en la

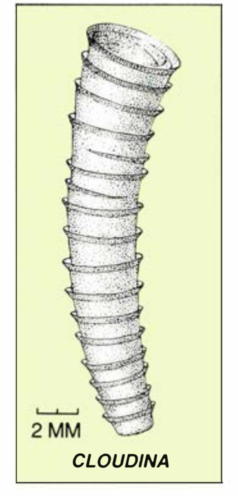


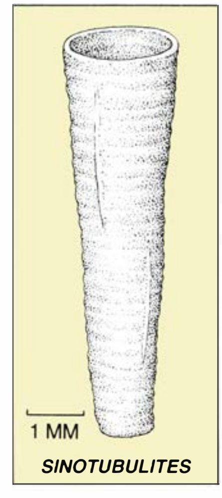
1. HELICOPLACUS, organismo que se extinguió hace 510 millones de años, tan sólo 20 millones después de hacer su aparición, presenta lo que podría denominarse un plan de organización experimental: las distintas partes que componen su cuerpo estaban organizadas de un modo que no tiene parangón en ninguna criatura actual. *Helicoplacus* presentaba un caparazón ahusado, revestido por un sistema espiralado de placas. Apareció durante el tránsito entre el Precámbrico y el Cámbrico. En ese intervalo surgieron más clases distintas de planes de organización corporal que en ninguna otra época anterior o posterior. La mayoría de ellos, como en el caso de *Helicoplacus*, resultaron ser ineficaces. El especimen que se muestra mide unos cinco centímetros de longitud.

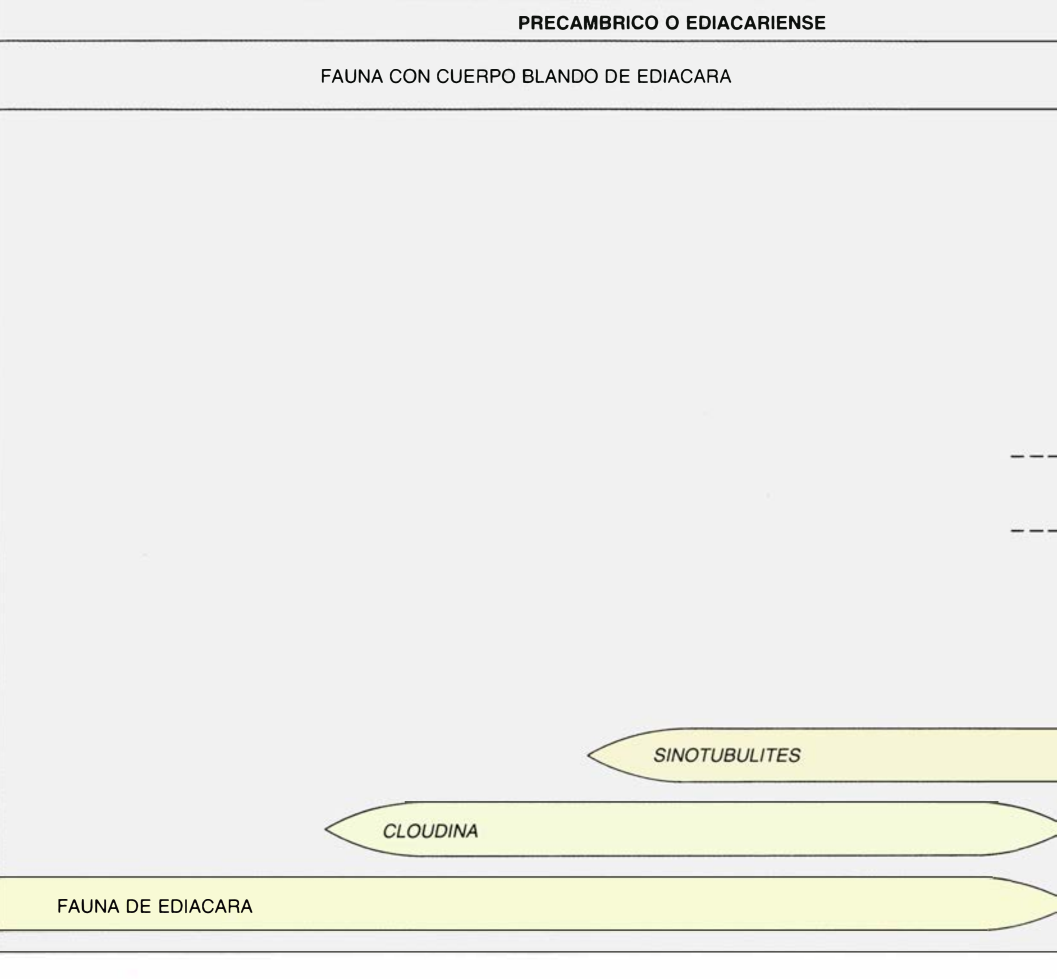
superficie de lo que era entonces el suelo marino. En este estadio se encuentran muchos menos restos que en los posteriores, pero ello puede deberse, en parte, a que los organismos de cuerpo blando se descomponen rápidamente y no suelen quedar fosilizados; de modo que no significa necesariamente que las especies de Ediácara no abundaran ni gozaran de amplia distribución. En esa fase también, se han encontrado fósiles provistos de concha, entre los que figura *Cloudina*, fósil desenterrado en Namibia cuya concha tiene forma de tubo y está compuesta de carbonato cálcico, y *Sinotubulites*, otro fósil tubular de carbonato cálcico que se ha descubierto en rocas precámbricas de China meridional.

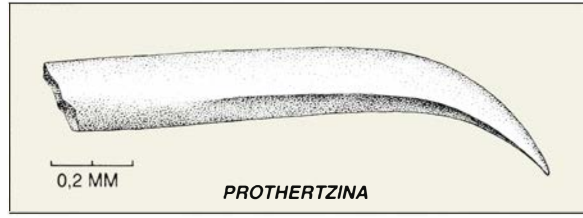
Este intervalo ha proporcionado, asimismo, otros fósiles en forma de tubo:

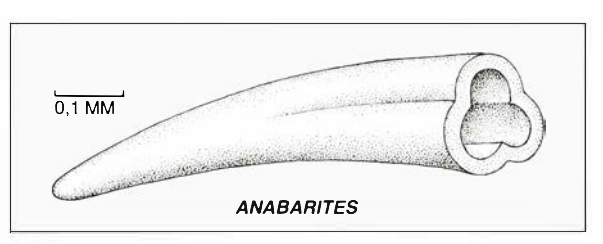


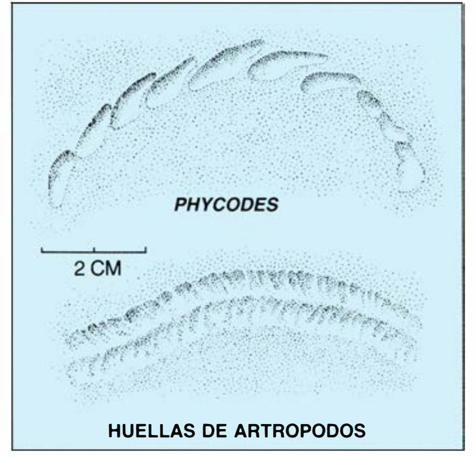


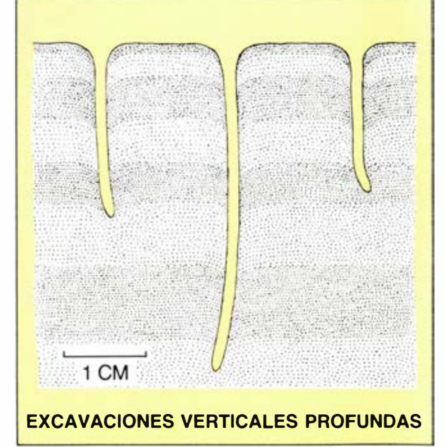






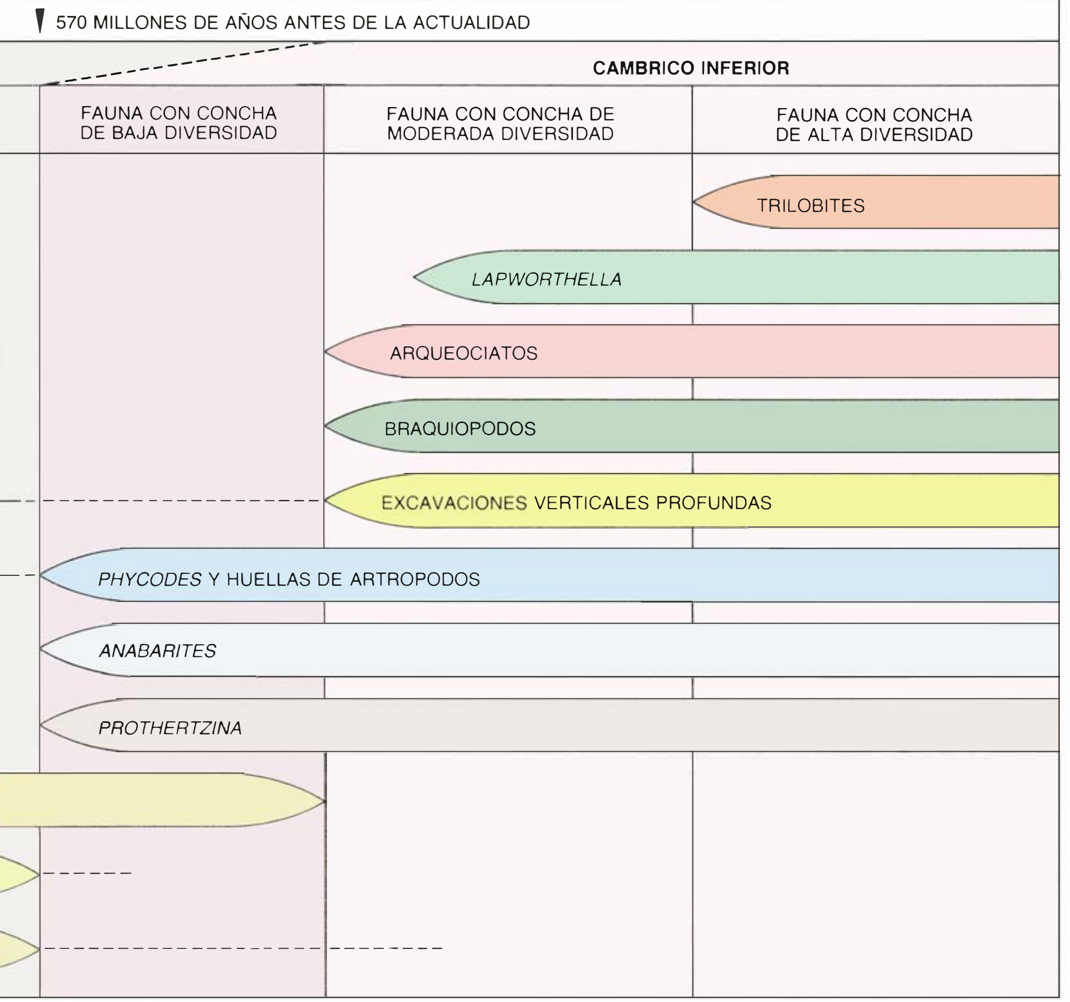


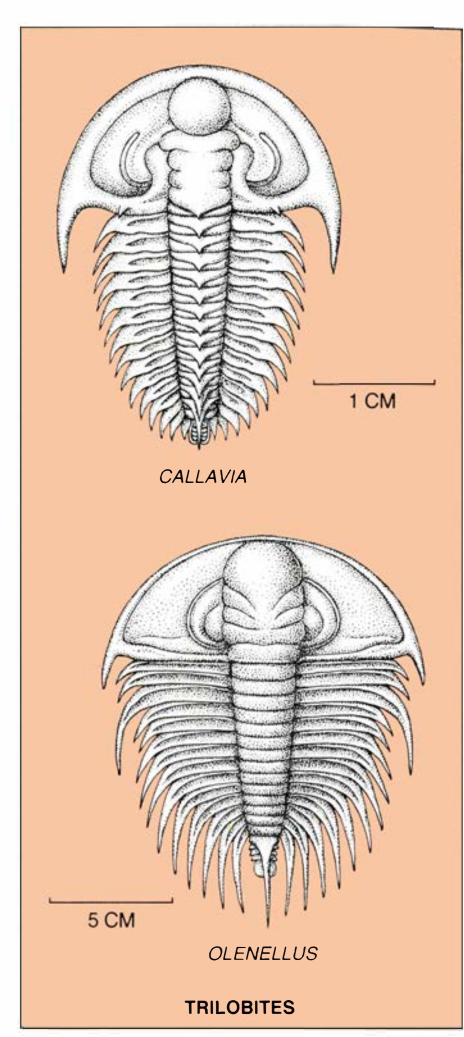




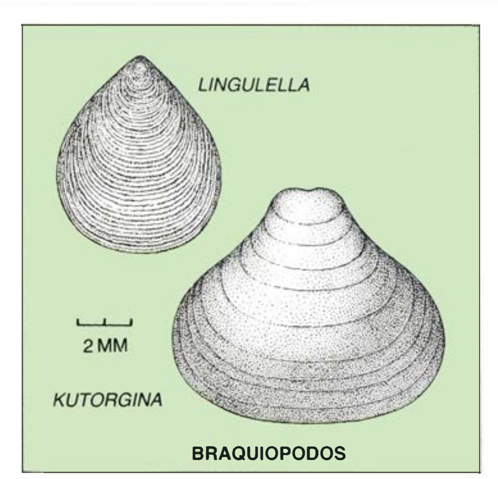
2. LA VIDA ANIMAL ganó en complejidad y diversidad a lo largo del tránsito Precámbrico-Cámbrico. (Todos los organismos ilustrados eran marinos.) La fauna de Ediácara, constituida por organismos de cuerpo blando con tendencia al aplanamiento, vivió en un intervalo de tiempo transcurrido entre 700 y 570 millones de años atrás, correspondiente al primer estadio de la transición. Este estadio asistió también a la aparición de *Cloudina* y *Sinotubulites*, fósiles de conchas tubuliformes, de carbonato cálcico. Un fósil característico del segundo estadio de la transición es *Protohertzina*, resto compuesto de fosfato cálcico que recuerda las espinas con las que algunos depredadores actuales aferran las presas; *Protohertzina* probablemente corresponde al garfio prensor de algún depredador primitivo. Otro fósil provisto de concha y perteneciente al mismo período es *Anabarites*. Este último y *Protohertzina* se encuentran en formaciones rocosas con amplia distribución geográfica: se les ha desenterrado en Asia, Australia, Oriente Medio y América del Norte. En las rocas de este período se observa un notable incremento, tanto en número como en diversidad, de las trazas fósiles, impresiones de huellas y excavaciones someras debidas a la acción ani-

los sabellítidos y vendoténidos. Los primeros miden, por lo general, unos centímetros de longitud y de uno a varios milímetros de diámetro. Corresponden a los fósiles de unas cubiertas tubulares compuestas originalmente por una sustancia orgánica flexible, que quizás alojaban animales filtradores con aspecto de gusanos. Los tubos de sabellítidos, junto con *Cloudina* y *Sinotubulites*, dan prueba de la existencia de unos animales tubícolas filtradores que adoptaron un tipo de vida sésil (sedentaria). Los vendoténidos son también fósiles tubulares y compuestos en su origen por una sustancia orgánica flexible, pero son mucho menores que los sabellítidos (no alcanzan el centímetro de longitud y de apenas una décima de milímetro de anchura). Los vendoténidos pudieran representar cubiertas de bac-

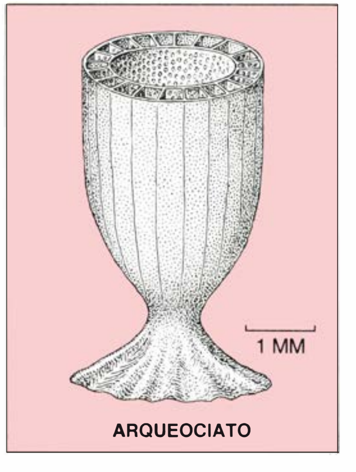




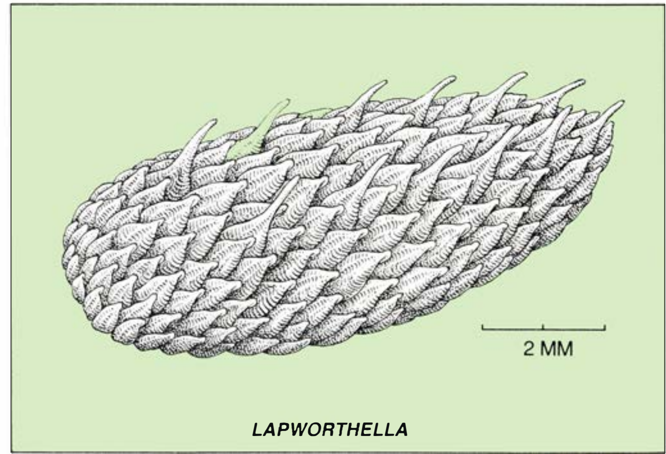
TRILOBITES



BRAQUIOPODOS



ARQUEOCIATO



LAPWORTHELLA

mal. Existen algunas huellas de gran complejidad; recordemos, por ejemplo, la de *Phycodes pedum*, que registra una serie de movimientos de alimentación y excavación, o ciertas huellas que presentan marcas en zigzag dejadas probablemente por algún artrópodo primitivo. (Los artrópodos, uno de cuyos representantes es la langosta actual, son organismos provistos de apéndices articulados.) Las formaciones rocosas pertenecientes a este estadio muestran, además, las primeras excavaciones verticales profundas. Durante el período siguiente aparecieron los braquiópodos (organismos provistos de una concha bivalva que recuerda la de algunos moluscos de nuestros días) y el extraño grupo de los arqueociatos, dotados de un esqueleto poroso, compuesto de carbonato cálcico y con pared doble. Hacia la mitad de este tercer período hizo su aparición *Lapworthella*, un animal acorazado. (La interpretación de *Lapworthella* que se muestra en la ilustracion es una reconstrucción basada en los escleritos sueltos fosilizados, piezas que formaron parte de una armadura o coraza.) La cuarta fase de la transición se caracteriza por la aparición de los trilobites, provistos de un exoesqueleto a modo de coraza, que mudaban a lo largo de su desarrollo.

terias formadas por secreción externa en colonias del Precámbrico.

Al comienzo del segundo estadio del período de transición aparecen ciertos fósiles (pertenecientes a animales o a fragmentos de los mismos) cuyas partes duras están compuestas por fosfato cálcico. De ellos, los más antiguos solamente tenían unos pocos milímetros de longitud, o incluso menos, y constituyen un grupo faunístico primitivo de escasa diversidad con concha fosfatada. Un ejemplo de éstos es el fósil en colmillo llamado *Protohertzina*, que presenta grandes similitudes microestructurales con las afiladas espinas que usan como garfios prensores los representantes de un *phylum* moderno de diminutos y voraces depredadores: los quetognatos o gusanos flecha. El propio *Protohertzina* corresponde, probablemente, a un garfio de alguna criatura similar y constituye en sí mismo el primer fósil que puede ser identificado con cierta seguridad como un resto de lo que fue un animal depredador. Junto con los fósiles fosfatados aparecen también algunas conchas de carbonato cálcico. La mineralogía original de estas conchas fósiles primitivas resulta, a veces, difícil de averiguar, pues el fosfato cálcico puede reemplazar al carbonato cálcico de una concha con tal fidelidad que lleguen incluso a conservarse rasgos estructurales de milésimas de milímetro.

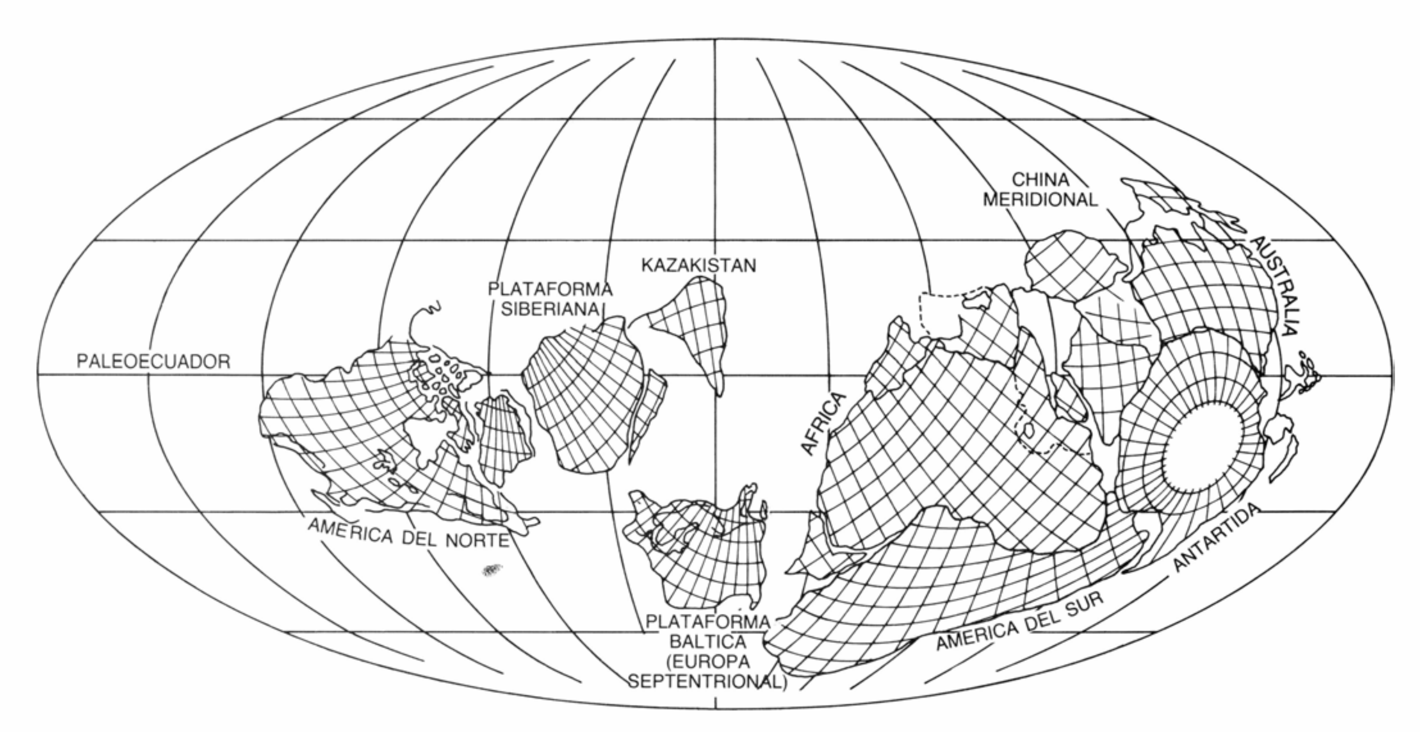
En torno a este mismo nivel estratigráfico se registra un incremento extraordinario, en número y diversidad, de las trazas y huellas que han quedado fosilizadas en los sedimentos del suelo marino. Aparecen por vez primera excavaciones verticales profundas y se observa una gran abundancia de trazas fósiles complejas, tales como *Phycodes pedum*, huella que da testimonio de una serie de movimientos de alimentación y excavación realizados por un animal que vivía enterrado en el sustrato. Hay también rastros en los que se observan unas estrías en zigzag originadas por los apéndices de un artrópodo reptador o excavador que actuaba sobre el sedimento.

La fauna de Ediácara, con una posible excepción, parece haberse extinguido ya en este nivel. Sin embargo, algunos paleontólogos creen que la ausencia de restos fosilizados de los animales de cuerpo blando que componen dicha fauna puede obedecer a la destrucción de los mismos, antes de fosilizar, por parte de animales excavadores carroñeros, cuyo número y actividad crece notablemente en ese momento.

El tercer estadio del tránsito entre el Precámbrico y el Cámbrico se caracteriza por la existencia de faunas provistas de concha con diversidad moderada. En la mayoría de las regiones del planeta donde aparecen esas faunas, lo hacen en estratos que se sitúan por encima mismo de los que contienen la fauna con baja diversidad. En la Plataforma siberiana, región que se extiende por Siberia central y occidental, la fauna con diversidad moderada se nos ofrece acompañada por los primeros arqueociatos: fósiles con forma de cáliz que poseen un esqueleto poroso compuesto por carbonato cálcico con pared doble. Los arqueociatos muestran una ligera semejanza con los corales y las esponjas, pero en realidad no presentan relaciones cercanas con ningún grupo actual y normalmente se les considera un *phylum* independiente. Los arqueociatos, en combinación con las algas calcáreas (algas pluricelulares cuyas ramificaciones y órganos de captación de la luz estaban reforzados por agujas de carbonato cálcico), dieron lugar a los primeros arrecifes resistentes a las olas, al crecer conjuntamente creando acumulaciones de material esquelético: biohermos.

Durante el cuarto estadio de transición (que se distingue por la presencia de las faunas con concha de alta diversidad), la distribución geográfica de los arqueociatos se amplía grandemente, alcanzando numerosas áreas muy alejadas de la Plataforma siberiana. En los sedimentos que se depositaron durante el mismo surgen, además, los primeros fósiles de caparazones de trilobites.

En el siglo XIX, resultaba bastante sencillo establecer el límite entre el Precámbrico y el Cámbrico; las áreas



3. DURANTE EL TRANSITO PRECAMBRICO-CAMBRICO, la geografía del planeta presentaba unas condiciones gracias a las cuales fue posible la eclosión de vida. En el Precámbrico superior, la mayor parte de las masas terrestres estaba concentrada formando un único supercontinente. La ruptura de este supercontinente (ocurrida a principios del Cámbrico) creó amplias regiones costeras, apropiadas para la colonización. Muchos de los continentes recién formados estaban en el Ecuador o cerca del mismo, con lo que en esas zonas dominaba un clima cálido y uniforme. Las distancias cada vez mayores entre los continentes del Cámbrico inferior fomentaron el desarrollo del provincialismo. El rayado trazado en los continentes señala las líneas de latitud y longitud.

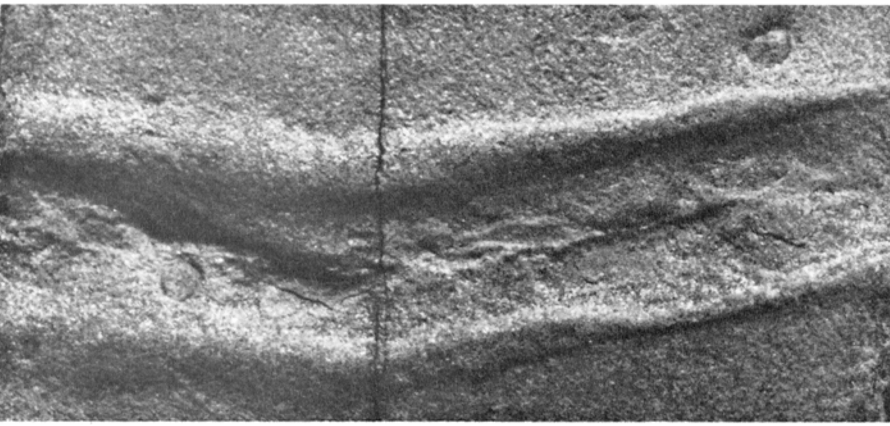
que por entonces se encontraban en estudio muestran, entre las capas de una y otra edad, importantes lagunas estratigráficas y discordancias (episodios que representan lapsos de tiempo en los que no hubo depósito de sedimentos o en los que éstos no se conservaron). El número creciente de datos de que disponen los paleontológos del siglo xx ha complicado la tarea de situar con precisión la frontera, ya que actualmente se conocen muchas regiones donde hay un paso gradual entre las formaciones precámbricas y cámbricas. La determinación de la zona limítrofe en una formación rocosa dada es necesaria para que los paleontológos correlacionen la información obtenida en un punto con la obtenida en otro y establezcan la edad relativa de las formaciones en cuestión.

Existen dos razones por las que es difícil correlacionar, entre dos puntos, ambas secciones estratigráficas, las del Precámbrico y las del Cámbrico. Constituye la primera el número menguado de especies fósiles conocidas de esa edad. La segunda es que muchas de las especies que había entonces presentan una amplia distribución estratigráfica (es decir, pueden encontrarse en estratos depositados a través de un amplio intervalo de tiempo) y, por tanto, no prestan suficiente apoyo para establecer subdivisiones bioestratigráficas en las secuencias sedimentarias.

Muchos de esos fósiles primitivos, además de presentar una dilatada distribución estratigráfica, están muy extendidos geográficamente. Citemos, por ejemplo, el caso de *Anabarites*, fósil en tubo, dotado con tres costillas interiores características. *Anabarites* aparece por primera vez en el estadio de las faunas con concha de baja diversidad y continúa existiendo posteriormente formando parte de las faunas de alta diversidad. Se han encontrado especímenes en Australia, China, India, Irán, Kazakhstán, Mongolia, América del Norte occidental y oriental y Siberia. La difundida repartición actual de algunos elementos de la fauna de Ediácara y de las faunas con concha primitivas es consecuencia de la posición que durante el Precámbrico superior y Cámbrico inferior ocuparon los continentes. La mayoría de ellos estaban próximos al Ecuador y existen buenas razones para suponer que una gran parte de lo que ahora constituye los continentes se encontraba en el Precámbrico superior integrando un único supercontinente.

A este respecto, Gerard C. Bond y sus colegas, del Observatorio Geológico de Lamont-Doherty, han hallado indicios de la formación, durante el tránsito Precámbrico-Cámbrico, de una fosa continental ("rift") situada en torno a los márgenes de América del Norte. La proximidad de los continentes recién separados en los estadios iniciales de un proceso de deriva continental, y el hecho de que tales masas se encontrasen aproximadamente en la misma latitud, posibilitó la dispersión de los animales: no existían ni océanos insalvables ni diferencias de temperatura extremas que impidiesen a las faunas emigrar desde una plataforma continental hacia otra.





4. LAS HUELLAS FOSILIZADAS dan una idea de la complejidad de los organismos que las dejaron. Algunas de las formadas en el Precámbrico, como la que se muestra en la fotografía superior, son el resultado de excavaciones horizontales someras, realizadas en los sedimentos del suelo marino. Tienen un milímetro de ancho aproximadamente. La huella que se muestra en la fotografía inferior pertenece al período Cámbrico y la dejó un organismo reptador similar a un molusco. Su anchura viene a ser de unos 1,5 milímetros.

El provincialismo (es decir, diferencias entre especies de distintos lugares) comenzó a desarrollarse en todo el mundo cuando aparecieron los primeros arqueociatos y trilobites. No hay duda de que durante todo el Cámbrico inferior se intensificó la tendencia al provincialismo en virtud de la dilatación de los océanos entre los continentes, cada vez mayor. Allison R. Palmer, de la Sociedad Geológica de América, ha mostrado, además, que en esa misma época comenzaron a desarrollarse, a lo largo de los márgenes de varios continentes, los cinturones carbonatados. Estos grupos de formaciones son áreas marinas de poca profundidad engendradas por la acumulación de conchas de carbonato cálcico. Al limitar el acceso al mar abierto, los cinturones carbonatados provocan que las faunas que viven en zonas situadas entre uno de ellos y la línea de costa evolucionen aisladas con respecto a las de otros continentes. El efecto se manifiesta de manera particular en algunos grupos de trilobites.

El clima que hubo con posterioridad al último episodio glaciar del Precámbrico fue, probablemente, bastante uniforme, dado que la mayoría de los continentes estaban entonces situados cerca del Ecuador. A medida que el clima global comenzó a hacerse más cálido, se empezaron a estabilizar a niveles relativamente bajos las provisiones de nutrientes de las aguas marinas

someras. Una disminución de la diferencia entre las temperaturas extremas de todo el globo podría haber contribuido a estabilizar las reservas de alimento marino, puesto que, en general, un menor gradiente de temperatura entre los polos y el Ecuador conduce a que los cambios estacionales en los océanos sean menos acusados y a que, por tanto, sea menor la cantidad de nutrientes procedentes de los fondos océanicos que alcance las aguas someras. Para muchos animales marinos, en particular para los que viven en los trópicos y están más habituados a condiciones estables que los que viven en zonas con variaciones estacionales acusadas, resulta decisivo disponer de un suministro de alimento que sea estable y no fluctuante.

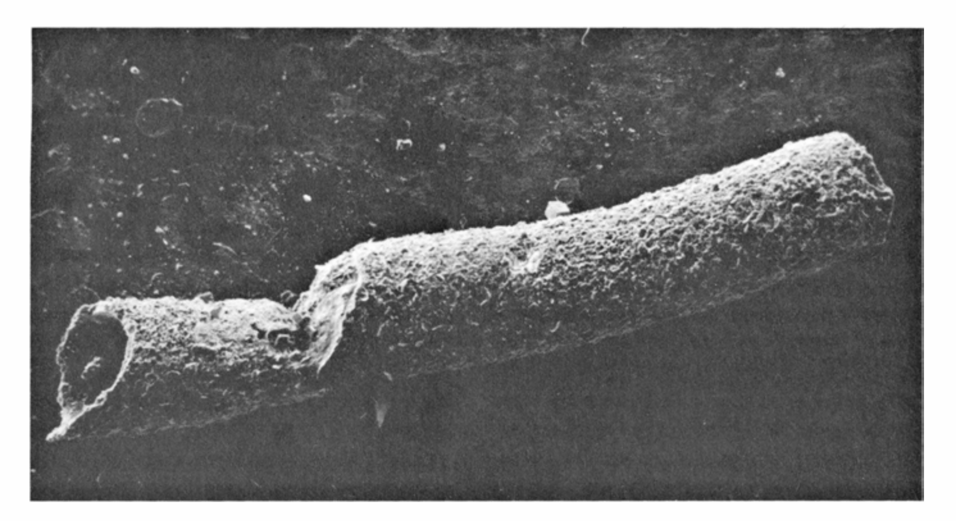
De hecho, el carácter limitado de las reservas de nutrientes disponibles durante el Precámbrico ayuda a explicar las formas aplanadas, tan poco comunes, de las criaturas que componen la fauna de Ediácara. El aplanamiento y delgadez del plan de organización corporal que presenta un organismo de Ediácara (por ejemplo, *Dickinsonia*, un fósil con forma de torta, cuyo grosor máximo no supera los seis milímetros y en cambio su diámetro puede alcanzar un metro) maximiza la proporción entre superficie y volumen. Un índice elevado en la proporción entre superficie y volumen es ideal para las estrategias alimentarias conocidas como fotoautotrofismo y quimioautotrofismo, para las que son favorables los ambientes que contienen cantidades pequeñas de nutrientes.

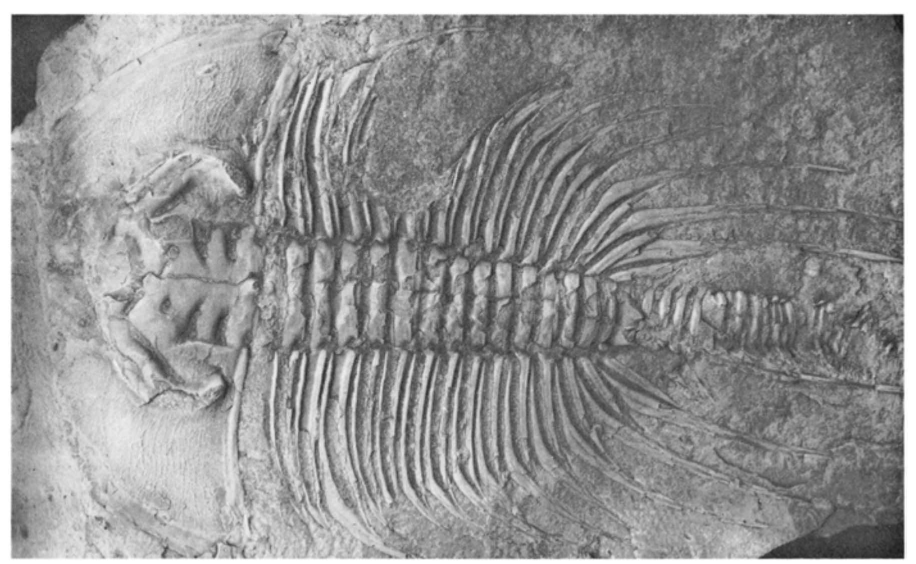
El fotoautotrofismo incluye una relación simbiótica con ciertas algas fotosintetizadoras. Dentro de los tejidos del huésped, las algas quedan a salvo de otros animales que podrían alimentarse de ellas. En contrapartida, las algas proporcionan al huésped nutrientes y eliminan los productos de desecho. Para que tal simbiosis pueda funcionar, una parte sustancial del cuerpo del huésped debe quedar expuesta a la luz solar, al objeto de que los vegetales realicen con eficacia la fotosíntesis. Muchos corales arrecifales modernos y algunos bivalvos tropicales alojan en simbiosis, dentro de sus tejidos, algas fotosintetizadoras.

La otra estrategia, el quimioautotrofismo, consiste en la toma directa de nutrientes a partir del agua del mar. Esto, en ocasiones, incluye también una simbiosis interna en la que el animal aloja bacterias quimiosintetizadoras. Esta estrategia es común, por ejemplo, entre los animales actuales que viven próximos a manantiales hidrotermales situados en mares profundos. Sin embargo, algunos de estos animales parecen absorber directamente los nutrientes disueltos en el agua, sin necesidad de la ayuda de bacterias.

La forma aplanada de los organismos que componen la fauna de Ediácara facilitaría, probablemente, una toma eficaz de los nutrientes disueltos en el agua del mar o la absorción de la luz por las algas fotosintetizadoras. De acuerdo con investigaciones recientes de Pamela Hallock-Muller, de la Universidad de Florida del Sur en San Petersburgo, las aguas pobres en nutrientes privilegian la asociación huésped-simbionte debido a que el huésped puede reciclar directamente sus productos de desecho, a través del simbionte, en vez de liberarlos en el medio ambiente. Por tanto, la fauna de Ediácara pudo haber estado bien adaptada a las condiciones marinas predominantes durante el Precámbrico superior, época en la que se supone que las aguas marinas someras escasearon en nutrientes.

Hacia el final del Precámbrico y durante la transición al Cámbrico, el suministro de alimentos se modificó, verosímilmente, en respuesta a los cambios que se produjeron en la química de los océanos; y otras estrategias alimentarias aumentaron entonces en importancia. El heterotrofismo –consumo de otros organismos (sean animales o plantas)– creció de modo notable en las postrimerías del Precámbrico. En este sentido, hay pruebas del aumento del heterotrofismo en el registro fósil de los estromatolitos, estructuras cupuliformes, columnares o cónicas, que forman capas; las construyeron praderas de algas que tapizaban el suelo marino. Los estromatolitos crecían en altura, en dirección a la luz solar, alternando capas sucesivas de

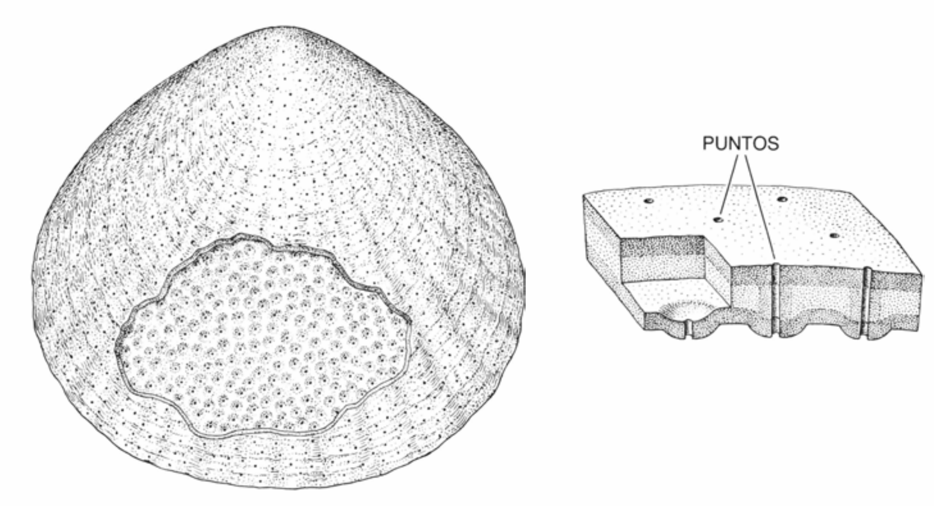




5. ANIMALES HERIDOS. Su hallazgo proporciona una prueba sólida de la existencia de depredación durante el período de transición. La imagen superior muestra una concha dañada y regenerada de *Hyolithellus*, aumentada unos 40 diámetros. En la fotografía inferior se ofrece el caparazón (o exoesqueleto), dañado y regenerado, del trilobite *Olenellus robsonensis* con un tamaño que es las tres cuartas partes del real. Que las heridas se hayan regenerado es un dato importante, porque demuestra que la herida se produjo cuando el animal aún vivía y no se trata de daños infligidos posteriormente a un cadáver o a una concha vacía.

mallas de algas, ricas en materia orgánica, con otras capas de partículas sedimentarias que quedaban atrapadas en las mallas. Aunque cada capa tenía un espesor inferior a un milímetro, su acumulación progresiva pudo formar grandes columnas o domos y algunos estromatolitos precámbricos llegaron incluso a alcanzar más de 10 metros de altura.

Hace cerca de 800 millones de años los estromatolitos sufrieron un drástico declive en su diversidad, declive que Stanley M. Awramik, de la Universidad de California en Santa Bárbara, ha atribuido a la aparición de animales que se alimentaban de algas: los estromatolitos pueden ser pastados superficialmente con facilidad, originándose perturbaciones en las mallas de algas que detienen su crecimiento.



6. ADAPTACION ANTIDEPREDATORIA. De ella dan fe los numerosos puntos o pequeños orificios que se observan en la concha de un grupo de animales conocidos como braquiópodos mickwitzíidos. Estos orificios podrían haber actuado como canales para transportar hacia el exterior sustancias químicas disuasorias.

Otra posible prueba del incremento del heterotrofismo se encuentra en los chert microfosilíferos, sedimentos compuestos por cuarzo microcristalino. Cuando se observan láminas delgadas de estos chert a través del microscopio petrográfico de transparencia, suelen distinguirse microbios fósiles englobados en la roca. A lo largo de un lapso de tiempo transcurrido entre 800 y 700 millones de años atrás, la cubierta de estos microfósiles fue adquiriendo vigor, quizá como un medio de protección ante la actividad de animales pacedores primitivos. Aproximadamente en el mismo nivel estratigráfico aparecen también huellas fosilizadas producidas por carroñeros y sedimentívoros. Casi con toda certeza, los animales que dejaron esas huellas fueron los antepasados de los organismos cámbricos provistos de concha.

Quizá lo más sorprendente de las faunas cámbricas resida en la aparición, en un intervalo temporal tan corto, de tipos de animales radicalmente distintos. ¿Qué provocó esa súbita diversificación? James W. Valentine, de Santa Bárbara, y Douglas Erwin, de la Universidad del Estado de Michigan, han propuesto que la posibilidad de un alto orden de remodelación genética, si se dio, debióse a que el genoma (la dotación total de genes) de los animales pluricelulares era, en el período de transición, menos compleja de lo que lo es hoy día. Gracias a que los ligámenes entre las distintas partes de los programas genéticos de desarrollo no presentaban, entre los animales del Precámbrico y Cámbrico, la complejidad que hoy les caracteriza, serían pocas las clases de mutaciones que resultasen fatales.

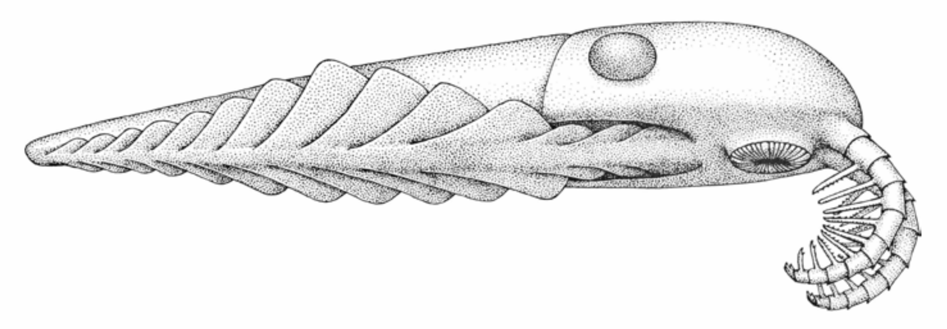
Semejante flexibilidad genética, argumentan Valentine y Erwin, constituye una de las dos razones por las que surgieron casi de repente tantos taxones superiores (tales como clases, la división más general en que se divide un *phylum*, y los propios *phyla*). La otra razón está relacionada con la existencia de múltiples nichos ecológicos que nunca habían sido ocupados. Por tanto, el período Cámbrico pudo asistir a la aparición de nuevos *phyla* y clases a un ritmo que no se ha vuelto a repetir: animales que eran radicalmente nuevos y carecían de competidores se convirtieron en los fundadores de nuevas clases y *phyla*.

Con la diversificación del Cámbrico, al tiempo que se establecían con rapidez nuevos *phyla* y clases, se originaron las primeras comunidades complejas de animales relacionadas por cadenas alimentarias. La existencia de nuevos tipos de comunidades creó, a su vez, nichos ecológicos para nuevos tipos de animales. Un elemento clave en el establecimiento de las comunidades animales es la depredación, que instituye entre ellos una cadena jerárquica de conexiones en la transferencia de alimento. Las nuevas pruebas que delatan el profundo impacto de los depredadores en las comunidades cámbricas vienen a descartar la vieja hipótesis que les otorgaba un papel menor. Pruebas que podemos agrupar en tres clases: la existencia de fósiles de depredadores, el hallazgo de especímenes correspondientes a presas que habían sufrido daños (algunas veces parcialmente recompuestos) y la aparición de adaptaciones antipredatorias en algunos animales.

Protohertzina, el fósil que se asemeja a un garfio prensor de un gusano flecha actual, representa un vestigio de un depredador del Cámbrico inferior. Otro depredador es *Anomalocaris*, organismo que acaban de reconstruir, casi por entero, Derek Briggs, de la Universidad de Bristol, y Harry Whittington, de la Universidad de Cambridge. *Anomalocaris* es gigantesco para las dimensiones habituales en el Cámbrico (mide unos 45 centímetros de longitud) y no recuerda a ningún animal actual. Su cuerpo tenía forma de lágrima aplastada, con los dos costados flanqueados por aletas natatorias. En su ancha cabeza surgían un par de apéndices articulados cuya función consistía en arrastrar las presas hacia una horrible boca en rodaja de piña revestida de dientes. *Anomalocaris* constituye, quizás, un ejemplo de un *phylum* experimental de corta duración. Briggs y Whittington sugieren que *Anomalocaris* fue, en gran medida, el responsable de otro de los mayores signos de depredación del Cámbrico: los fósiles de trilobites heridos.

Existen numerosos especímenes fosilizados de trilobites en los que se observan mordeduras causadas en intentos por arrancarles el caparazón. En la mayoría de los casos, los daños se regeneraron parcialmente, lo que nos manifiesta que el caparazón estaba todavía adherido al trilobite y que, por tanto, esos daños no fueron ocasionados por carroñeros que actuasen tras la muda del animal. Hay otros ejemplos de daños causados por depredadores; así, las perforaciones que presentan algunas pequeñas conchas fósiles. Estos orificios se asemejan a los realizados por ciertos depredadores modernos que perforan las conchas con el fin de ingerir la materia blanda que hay en su interior.

La tercera prueba que indica que la depredación tuvo en el Cámbrico inferior un importante papel es la canti-



7. UN DEPREDADOR que hubiese vivido durante el Cámbrico inferior y Cámbrico medio podría haberse alimentado en gran parte de trilobites. Este organismo, *Anomalocaris*, era mucho mayor que la inmensa mayoría de los animales de su tiempo (alcanzaba, aproximadamente, los 45 centímetros de longitud). Poseía unos apéndices prensores con los que conducía el alimento hacia la boca; se desplazaba generando un movimiento ondulante a lo largo de unas membranas con aspecto de aletas que tenía situadas en su parte inferior.

dad de elementos presentes en los animales de esa época que pudieron haber cumplido una función antipredatoria. Por ejemplo, las conchas y exoesqueletos que aparecen por primera vez en varios de los nuevos *phyla* servían, probablemente, como defensa contra los depredadores. Las excavaciones verticales profundas en el sustrato, abundantes en la época de las faunas con concha de diversidad baja y moderada, podrían haber constituido refugios ante los depredadores que eran incapaces de atravesar el sedimento. Varias especies de trilobites desarrollaron largas espinas que tal vez dificultaron el que fuesen atacados por algunos depredadores contemporáneos como *Anomalocaris*.

Stefan Bengtson, del Instituto de Paleontología de Upsala, Ed Landing, del Servicio Geológico del Estado de Nueva York, y Simon Conway Morris, de Cambridge, han mostrado, además, que muchas conchas fósiles de escasa magnitud corresponden en realidad a escleritos: piezas desprendidas de una suerte de armadura revestida por una malla de púas, que protegería la superficie externa de animales que se arrastraban lentamente. Estos animales podrían haber sido semejantes a pequeños puercoespines o a erizos marinos. Otra adaptación la encontramos en una clase de braquiópodos (organismos provistos de una concha formada por dos valvas que guarda cierto parecido con la de algunos moluscos bivalvos) conocida como mickwitzíidos. Estos animales tienen las paredes de la concha perforada por numerosos poros o "puntos". A través de los puntos podrían haber liberado hacia la superficie externa de la concha sustancias químicas disuasorias que ahuyentasen a depredadores y parásitos.

Por tanto, los depredadores formaron parte importante del medio marino del Cámbrico. Los exoesqueletos, que en principio pudieron haberse desarrollado como estructura protectora, constituyeron también un factor clave en la evolución de algunos planes de organización corporal notablemente innovadores. Por ejemplo, sin una concha bivalva los braquiópodos no habrían logrado producir las corrientes internas que hacen eficaces sus mecanismos de filtración de nutrientes.

Pero aunque el proceso de formación de las comunidades cámbricas se va conociendo con mayor claridad, queda por resolver una cuestión central: ¿por qué la revolución del Cámbrico sucedió entonces y no diez o incluso cientos de millones de años antes? Problema que reviste especial dificultad si tenemos en cuenta que los animales carroñeros y los pacedores (que conocemos por sus huellas fósiles) aparecieron 200 millones de años antes del comienzo del Cámbrico.

Quizá la respuesta podría hallarse en la química de los océanos. La concentración de fosfatos en el agua del mar, así como la de isótopos de sulfuro y estroncio, experimentó drásticas fluctuaciones (que a duras penas entendemos) durante el tránsito Precámbrico-Cámbrico. Tal como Peter Cook y John Shergold, del Servicio de Recursos Minerales, Geología y Geofísica de Camberra, han sugerido, los amplios depósitos de fosfatos descubiertos en muchas partes del mundo en sedimentos del Precámbrico y Cámbrico, podrían representar un episodio global de fosfogénesis, durante el cual la creciente disponibilidad de fosfatos y nutrientes hiciese más fácil para los animales el formar esqueletos fosfatados.

Pero esta hipótesis tropieza con un obstáculo serio: en el límite entre el Precámbrico y el Cámbrico las conchas calcáreas abundaron, por lo que se ve, tanto como las fosfatadas. Quizá sea más acertado, entonces, considerar el episodio de sedimentación fosfatada integrada en un suceso más amplio, a lo largo del cual los océanos experimentaron un incremento súbito en la cantidad de nutrientes disponibles. Un medio rico en nutrientes, al dejar de primar la bioenergética de la relación huésped-simbionte, favorecería la multiplicación de carroñeros y sedimentívoros, lo que, a su vez, instaría la propagación de los depredadores. En el momento en que estos organismos heterótrofos alcanzaron lo que podría llamarse una biomasa crítica, comenzaría una "reacción ecológica en cadena" (según la expresión de Martin Brasier, de la Universidad de Hull): animales de desarrollo reciente hicieron posible la creación de nichos ecológicos ocupados por otros animales de aparición aún más reciente, dando como resultado, con el tiempo, la formación de comunidades complejas en las cuales proliferarían los organismos provistos de concha.

La fauna de Ediácara (y los demás animales precámbricos) se originó en un mundo que se caracterizaba por la existencia de un supercontinente extenso, una glaciación que iba disminuyendo y una disponibilidad de recursos de nutrientes marinos relativamente baja. La extraordinaria diversidad de especies del Cámbrico, y el nutrido número de sus individuos, aparecieron, por contra, en un mundo marcado por la desintegración del supercontinente (lo que posibilitó la formación de extensas zonas costeras tropicales) y por la existencia de reservas abundantes de alimento marino. Todavía no se sabe con certeza si los animales cámbricos aparecieron en virtud de esos cambios en el medio ambiente global, favorecidos por las series de alteraciones fortuitas en la programación genética de los animales o como consecuencia de algún tipo de combinación entre esas causas y otros factores desconocidos.

Cualquiera que fuese la razón de su origen, las innovaciones biológicas de la base del Cámbrico (aparición de organismos con concha, depredadores y excavadores profundos) colonizaron el mundo con sorprendente rapidez. La combinación entre influencias ambientales (aguas ricas en nutrientes) y cambios bióticos (aparición de los depredadores) modificó, de raíz, la naturaleza de las comunidades animales. Los animales modernos, seres humanos incluidos, son los descendientes directos de animales que hicieron su primer acto de presencia durante la explosión de vida del Cámbrico y el estilo de interacción ecológica que introdujeron ha caracterizado la inmensa mayoría de las comunidades animales de los últimos 570 millones de años.

Acústica de las antiguas campanas chinas

Los juegos de campanas de bronce constituyeron, hasta su desaparición, hace unos 2000 años, importantes instrumentos de orquesta. El análisis de un juego descubierto por arqueólogos ha revelado su complejo diseño acústico

Sinyan Shen

En 1978 se excavó en la provincia de Hubei, en el sur de China, un juego de campanas de tal magnitud que ocuparía el escenario entero de una moderna sala de conciertos. El juego, que data del siglo v a. de C., consta de 65 campanas, que cubren 5 octavas, registro superior al de la mayoría de los instrumentos contemporáneos. Unas inscripciones en filigrana de oro grabadas en las campanas y en los soportes prueban la existencia de una teoría musical muy elaborada, que especificaba el diseño, las escalas y la instrumentación de las antiguas orquestas. Ese registro, y las recientes investigaciones efectuadas sobre el propio juego de campanas, han instado una nueva redacción de la historia de la acústica.

Las antiguas inscripciones confirmaron lo que los especialistas modernos empezaban a intuir: las campanas se construían de tal forma que cada una podía producir dos tonos de altura distinta. Esa característica distingue las campanas chinas de las occidentales de iglesia que, como sabemos, dan tonos únicos, prolongados; a diferencia de las campanas de iglesia, las chinas permitían la ejecución de una música compleja y de ritmo rápido. Por motivos todavía no esclarecidos, los principios y la práctica que rodearon a ese diseño tan particular no se transmitieron a las generaciones sucesivas; y así, durante más de 2000 años se ha ignorado el modo de tocar ese instrumento.

Reúnen las campanas chinas gran número de propiedades inhabituales, cuya complejidad y precisión sólo pueden apreciarse a la luz del diseño que permite la obtención de dos tonos. Desde el descubrimiento de este juego de campanas los estudios de las características vibratorias y de los métodos de afinación han puesto de manifiesto la profundidad de los conocimientos de los metalúrgicos y de los músicos chinos. El diseño de las campanas requiere unos conocimientos teóricos de física e ingeniería cuyo desarrollo no se creía anterior al siglo XVIII. De hecho, los principios acústicos aplicados en las campanas chinas de bronce han sorprendido incluso a los acústicos del siglo XX.

En Occidente, el estudio de la acústica es relativamente reciente. En 1787, el físico alemán Ernst F. Chladni espolvoreó arena sobre unas placas vibrantes, para demostrar que ciertas zonas de las placas se mantenían estacionarias durante la vibración. Esas regiones sin movimiento se denominaron líneas nodales; su distribución describe los modos que toma un cuerpo vibrante. Cada modo normal se asocia a una frecuencia característica de vibración y la frecuencia de la vibración determina la altura percibida.

Los cuerpos vibrantes se mueven simultáneamente en muchos modos distintos y generan muchas frecuencias distintas, denominadas parciales. El parcial de frecuencia más baja recibe el nombre de fundamental; existen, además, muchas frecuencias superiores: los sobretonos. Cuando se percute una campana o se pulsa una cuerda, se generan todas esas frecuencias, pero unas suenan con más volumen (intensidad) que otras. La intensidad relativa de los parciales de un sonido musical constituye su calidad sonora (timbre), igual que cierta combinación de longitudes de onda determinan el color de la luz.

En 1890 Lord Rayleigh estudió las campanas de la iglesia de su villa, Terling, Inglaterra; también experimentó en su laboratorio con varias campanas. Identificó seis parciales. Rayleigh, que colocó la primera piedra del subsiguiente estudio de la acústica de las campanas, creyó que éstas sólo generaban un tono fundamental. Puesto que sus ensayos se restringieron a las occidentales, no pudo prever la lección que darían las milenarias campanas chinas.

Hace unos 80 años comenzaron a recuperarse campanas en los yacimientos arqueológicos de China. Posterior-



1. JUEGO DE CAMPANAS de Zenghou Yi, gobernante de un territorio chino en el siglo v a. de C.

mente aparecieron juegos y conjuntos completos de campanas; hasta hoy se han recuperado miles de campanas y más de 50 juegos completos. Pese a estudiarse con detenimiento, hasta 1977 no advirtieron los investigadores que de las campanas podían obtenerse dos tonos. Persistieron las dudas hasta que, en 1978, se descubrió el juego completo de la provincia de Hubei.

Habían pasado inadvertidas pistas anteriores. Al estudiar el juego de campanas Jing-li, excavado en 1957 en la provincia de Henan, los científicos del Instituto Nacional de Investigaciones Musicales interpretaban "El Oriente es rojo" utilizando los tonos obtenidos percutiendo las campanas en el centro. Faltaba un $mi_5^{\#}$. Con objeto de completar la pieza el equipo encontró la nota percutiendo lateralmente la campana $do_5^{\#}$, logro que se consideró meramente fortuito.

En 1977 Huang Xiang-peng, Lu Ji, Wang Xiang, Gu Bo-bao y sus colaboradores examinaron en ese instituto un juego de campanas hallado en la provincia de Shanxi y observaron que, cuando se percutían lateralmente, emitían un tono superior al generado al golpearlas en el centro. El intervalo que mediaba entre los tonos siempre era una tercera mayor o menor, diferencia de frecuencia equivalente a cuatro o cinco teclas consecutivas en el piano. La observación del equipo despertó vivas discusiones sobre si el fenómeno era accidental o deliberado y sobre si el segundo tono constituía una fundamental o un sobretono.

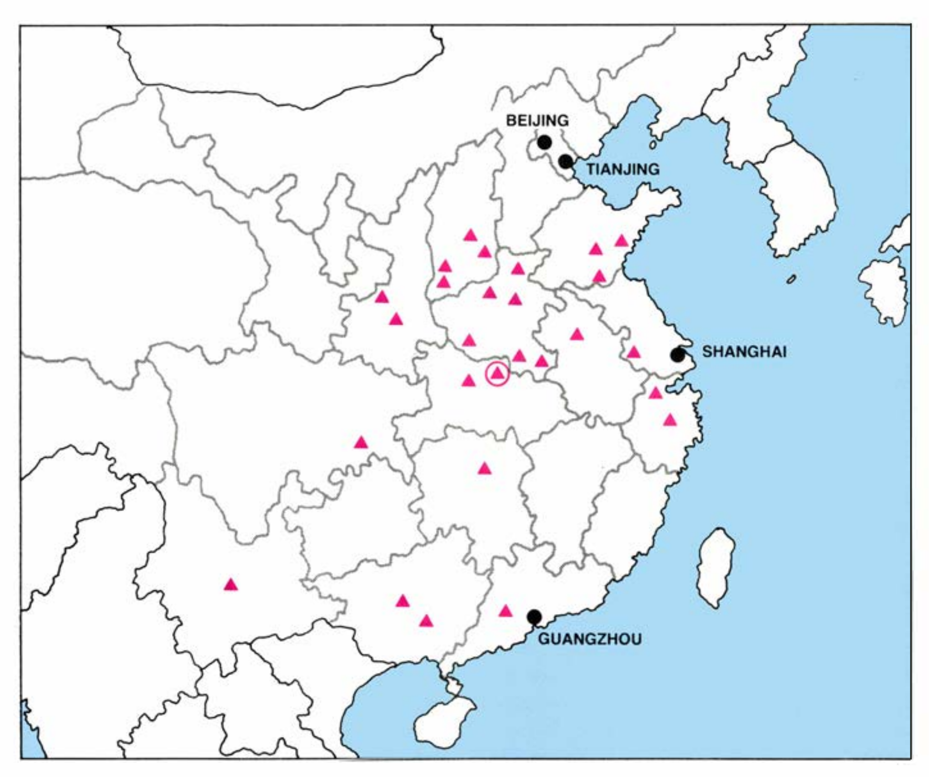
Los investigadores emprendieron entonces el estudio de más de 200 campanas de los períodos Shang (siglos XVI a XI a. de C.) y Zhou (siglo XI hasta el 221 a. de C.), que cubren el intervalo de creación de juegos de campanas, y concluyeron que las campanas se construían para que emitieran dos tonos. En cierto juego, las posiciones laterales de percusión aparecían decoradas con glifos del fénix, práctica probablemente ligada a las antiguas leyendas chinas en las que el canto de ese ave representa a la música.

Cuando, un año más tarde, se encontró el magnífico juego de 65 campanas de la provincia de Hubei, quedó corroborada la conclusión de los especialistas. El juego de campanas se había enterrado en la tumba de Zenghou Yi, marqués de un antiguo territorio denominado Zeng. Formaba parte de dos grandes orquestas, también conservadas en la tumba del señor. Las campanas *zhong*, de bronce, que, complementándose, formaban un juego llamado *bian-zhong*, aparecieron intactas y casi perfectamente afinadas. Los tesoros musicales del marqués Yi confirmaron el diseño de doble tono de los juegos de campanas, gracias a las detalladas inscripciones que portaban los propios instrumentos.

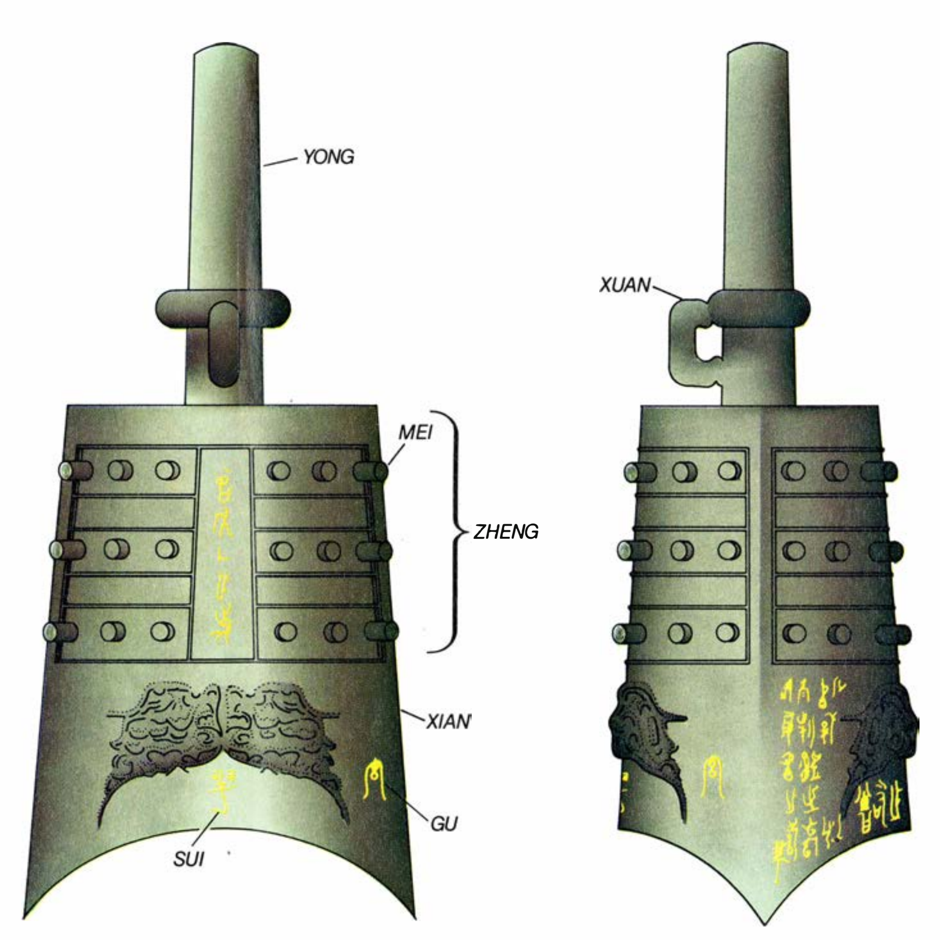
Los juegos de campanas estaban destinados a la interpretación de música acompañados de una orquesta. Sus características no podían ser, pues, las



Constituye el más impresionante de los juegos de campanas *zhong* recuperados hasta hoy. Consta de tres niveles de campanas, montadas en un armazón en forma de L. Estudios acústicos exhaustivos han revelado las singulares características merced a las cuales cada campana emite dos tonos de gran pureza.



2. MAPA DE LOS HALLAZGOS de juegos de campanas efectuados en China; sólo se consideran las provincias orientales y sudoccidentales, puesto que todos los juegos se hallaron en esos territorios. Desde 1900 se han desenterrado más de 50. Una circunferencia señala el lugar donde se halló el juego de Zhenghou Yi.



3. CARACTERISTICAS DE LA CAMPANA *ZHONG*, que guardan una estrecha relación con la calidad sonora y la actuación del instrumento, mostrado aquí de frente (*izquierda*) y de lado. Al ser asimétrica su sección, la campana puede emitir dos tonos, cuya pureza se refina por medio de las puntas de bronce *mei*. Algunas campanas portan también inscripciones que señalan los puntos exactos donde deben percutirse.

mismas que las de uso ceremonial o religioso. Las unidades que los forman deben presentar un campo dinámico muy amplio, que permita la interpretación de melodías complejas; su sonido, agradable al oído, debe atenuarse con rapidez, sin ecos prolongados.

La configuración geométrica de las campanas resulta crucial para obtener esas propiedades acústicas. La campana *zhong* tiene una diseño asimétrico. A diferencia de la campana destinada al culto, de sección circular, la *zhong* es ovalada: su sección horizontal es un óvalo aplanado. El labio de la campana no se halla en un plano, sino que, por delante y por detrás, se arquea hacia arriba, y baja formando una especie de cuerno en los laterales derecho e izquierdo. Las caras frontal y superior se reúnen en una costura denominada *xian*. Las cuatro regiones superiores en que se divide el cuerpo están recubiertas de 36 puntas de bronce, denominadas *mei*.

En el juego *bian-zhong* las campanas *zhong* se suspenden de un collarín, llamado *xuan*, colgado de un gancho situado en una vigueta del armazón de dicho conjunto instrumental. Las campanas, que carecen de badajos, se ordenan en pisos y se percuten con distintos tipos de mazas. Las piezas de registro agudo y medio suelen colgarse al nivel de los ojos, o por encima de ellos; se utilizan mazas que semejan martillos. Las campanas de registro grave se cuelgan en el piso inferior y se percuten, casi en horizontal, con varillas.

Un juego de campanas formado por varias docenas de unidades requiere de cinco a siete músicos. Los intérpretes de registros distintos se sitúan a distintos lados. La boca de la campana cuelga en un ángulo de unos 30 grados respecto de la vertical, compensada por una prolongación larga y pesada, denominada *yong*, que bascula hacia atrás; el lado que debe percutir el músico le queda encarado. Según la altura del tono que producen, el tamaño de las campanas *zhong* mide desde unos pocos centímetros hasta más de un metro: estas últimas, bastante grandes para lo que hoy se acostumbra.

Los dos tonos fundamentales, que constituyen la peculiaridad de esos instrumentos, se generan en dos regiones distintas de la superficie de la campana. Uno se produce en la región central inferior de la campana, en la posición denominada *sui*; el otro tono en zonas situadas a la izquierda y a la derecha de *sui*, en la posición *gu*. Se dice



4. ANALISIS ACUSTICO que reveló la precisión del diseño *zhong*. Además de sus dos tonos fundamentales, los ingenieros zhou aprendieron a manipular los sobretonos de las "voces" de las campanas. Wang Xiang (*sentado*) y Huang Xiang-peng, del Instituto Nacional Chino de Investigaciones Musicales, aparecen aquí analizando los tonos del juego de campanas de Zhenghou Yi. A pesar del tiempo transcurrido, la afinación de las campanas se conservaba perfecta.

que el término *sui* significa "espejo"; probablemente haga referencia a la semejanza que se advierte entre la curva del labio de la campana y la del espejo cóncavo que en aquellos tiempos se utilizaba para prender fuego. *Gu* significa "tambor", o "generador de música". Debido al fuerte énfasis ejercido por la cultura en favor del uso de la mano derecha, el *gu* diestro se tocaba mucho más a menudo que el izquierdo.

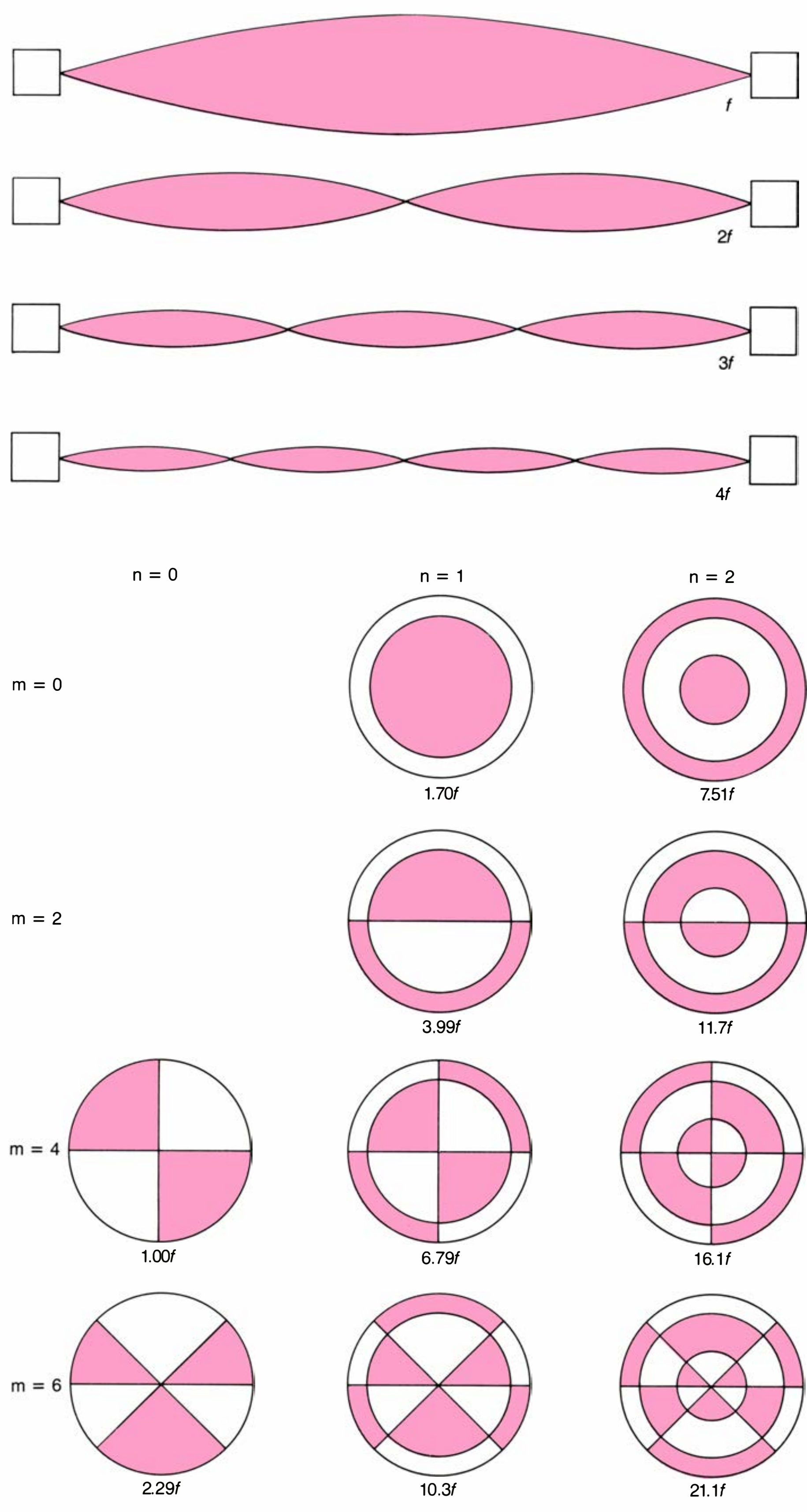
El empleo de campanas de doble tono facilita una interpretación eficaz y reduce el tamaño total del juego. El diseño de las campanas occidentales no es tan práctico. El tono de "golpe" de las campanas circulares occidentales (el tono que percibe el oyente) no es la fundamental, sino una octava superior a ésta. Por ejemplo, el sonido que genera una campana moderna cuya fundamental sea el do_3 central de 256 ciclos por segundo se percibe como do_4 de 512 ciclos por segundo. Pesa unos 375 kilogramos. De acuerdo con la regla aproximada según la cual el tono de una campana circular es inversamente proporcional a la raíz cúbica de su masa, el decremento de la frecuencia en un factor de dos requiere un incremento de masa de ocho veces la inicial. La campana que diera el tono percibido como do_3 pesaría unas 3 toneladas —casi 450 kilogramos más que el conjunto de todas las campanas y soportes del juego Zenghou Yi.

La incapacidad de crear una campana que emita su fundamental ha impuesto serias limitaciones en lo que se refiere a los materiales y técnicas empleados en la fundición. El diseño de las campanas de iglesia es fruto de una meticulosa experimentación desarrollada durante siglos. El procedimiento chino, resultado a su vez de milenios de trabajo, se perdió tras el período Han (del 206 a. de C. al 220 d. de C.). ¿Qué secretos acústicos se les pasaron por alto a los maestros occidentales?

Una campana es un cuerpo de gran complejidad acústica. Sus parciales no pueden expresarse mediante razones aritméticas simples, a diferencia de lo que ocurre en los casos de una cuerda completamente elástica o una columna vibrante de aire, cuyas frecuencias corresponden a las razones 1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6, etcétera. Tanto la campana *zhong* ovalada como la campana circular de iglesia son adaptaciones especiales del sistema acústico conocido por placas vibrantes. En las placas y en las campanas, un incremento de grosor y de elasticidad del material vibrante aumenta la frecuencia de vibración, mientras que los incrementos del diámetro y de la densidad disminuyen la frecuencia de vibración.

Mary D. Waller, de la Facultad de Medicina para la Mujer, de Londres, estudió los modos normales de las placas circulares vibrantes y publicó sus resultados en 1937. Sus figuras nodales están formadas básicamente por radios (simbolizados con la letra *m*) distribuidos simétricamente alrededor del centro de la placa y círculos (simbolizados con la letra *n*) concéntricos con el perímetro de la placa. El modo más sencillo, aquel que corresponde al tono fundamental, presenta cuatro líneas nodales, que dividen la placa en cuatro secciones vibrantes, como si se tratara de un pastel. En cualquier momento que se considere, los segmentos adyacentes se moverán siempre en sentido opuesto. El siguiente modo, que genera una frecuencia 1,7 veces la del fundamental, presenta sólo un círculo nodal, que define un segmento circular interior y un anillo exterior. Diversas combinaciones de radios y círculos generan otros modos, creándose una rica interacción entre frecuencias parciales.

En términos acústicos, una campana circular se comporta como una placa acampanada suspendida del centro. Los modos normales de una campana



5. FRECUENCIAS DE LOS PARCIALES. Confieren al sonido su calidad tonal, el denominado timbre, y son resultado de los diversos modos de vibración que adopta un cuerpo. La frecuencia más grave se denomina fundamental; las restantes constituyen los sobretonos. Cuando se pinza una cuerda tensa (*arriba*), genera parciales que son múltiplos enteros de la fundamental *f*. En cambio, una placa vibrante (*abajo*) genera parciales que no se relacionan entre sí según razones aritméticas sencillas. Las frecuencias resultantes dependen de la combinación de radios nodales (*m*) y círculos nodales (*n*): las regiones de la placa que permanecen sin movimiento durante la vibración. Se simbolizan aquí en rojo y en blanco los movimientos de las secciones en sentidos opuestos. Las campanas, redondas u ovaladas, constituyen un tipo particular de placa vibrante.

redonda, vista desde arriba, son muy parecidos a los dibujos que se han observado en las placas circulares. El movimiento vibratorio es más intenso en el borde. Cuando se golpea la campana, se fuerza hacia dentro la zona percutida y se empujan hacia fuera las regiones adyacentes; seguidamente el borde pasa por su configuración circular inicial y forma un anillo alargado, perpendicular al primero.

En el transcurso de esas vibraciones ciertas partes de la campana se mantienen bastante quietas, en relación a otras zonas, precisamente en los puntos de intersección de las distorsiones circulares. Estos puntos representan las líneas nodales, los denominados meridianos nodales. En puridad no se trata de nodos, puesto que las intersecciones no son exactas y persiste cierto movimiento en el plano de la superficie. Ese movimiento es el que hace vibrar un vaso de cristal cuando se frota el borde con un dedo humedecido.

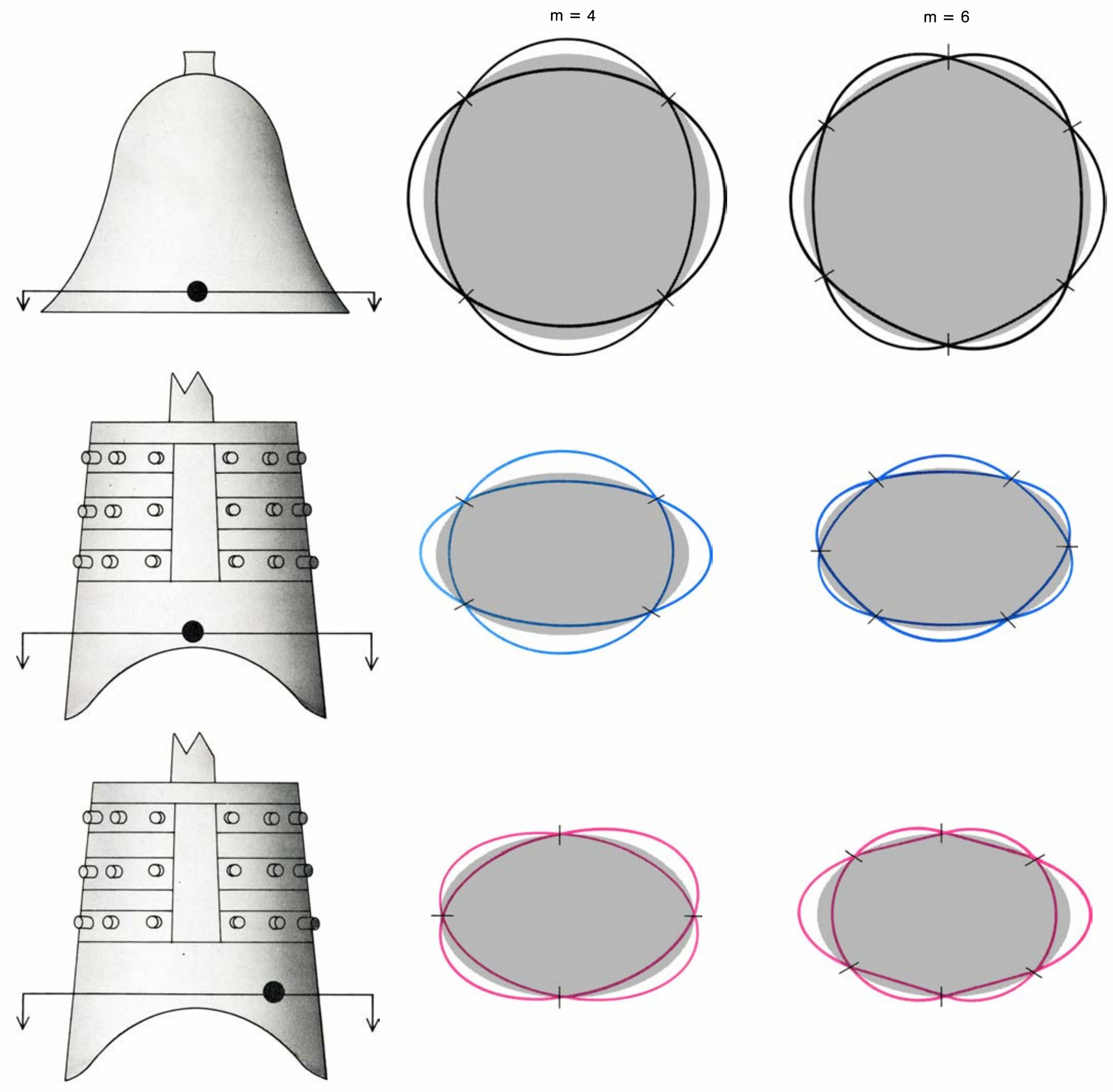
Los meridianos nodales de las campanas redondas se distribuyen uniformemente, como los radios nodales en una placa. Esa simetría posibilita el uso de badajos en las campanas circulares, pues se obtienen los mismos efectos vibratorios cualquiera que sea el punto de percusión del borde. Por el contrario, los meridianos de las campanas *zhong*, asimétricas, no se distribuyen de forma uniforme. Consecuencia de tal asimetría es que para cualquier número dado de líneas nodales cabe más de una distribución espacial.

En efecto, la campana *zhong* presenta dos juegos de modos bien definidos, que pueden activarse de forma selectiva golpeando en distintas posiciones de la campana, las posiciones *sui* y *gu*. Si bien los dos tonos fundamentales tienen el mismo número de líneas nodales ($m = 4$ y $n = 0$), la situación de las líneas es distinta, y, por tanto, también lo son las frecuencias generadas. En esa "degeneración" de los modos radican las extraordinarias propiedades acústicas de los juegos de campanas. El modo *gu* genera frecuencias más agudas que el *sui*, pero no son mutuamente excluyentes: comparten parciales de alta frecuencia, producidos por modos de complejidad superior.

Los chinos de la antigüedad refinaron su diseño de doble tono hasta obtener dos juegos de modos, de distinto carácter acústico pero de función musical comparable. Separaron los dos tonos de cada campana excluyendo las calidades comunes. Por ejemplo,

cuando se percute la posición *sui*, las caras y los laterales de la campana experimentan su mayor movimiento, mientras que las zonas *gu*, intermedias, se corresponden con los modos silenciosos e inmóviles. Las zonas *sui* se convierten en nodos cuando se percute la campana en la posición *gu*. Así, las posiciones de toque se sitúan en los puntos que menos se perturban cuando se tañe la otra posición, que es, a su vez, la zona menos afectada en la producción del otro tono.

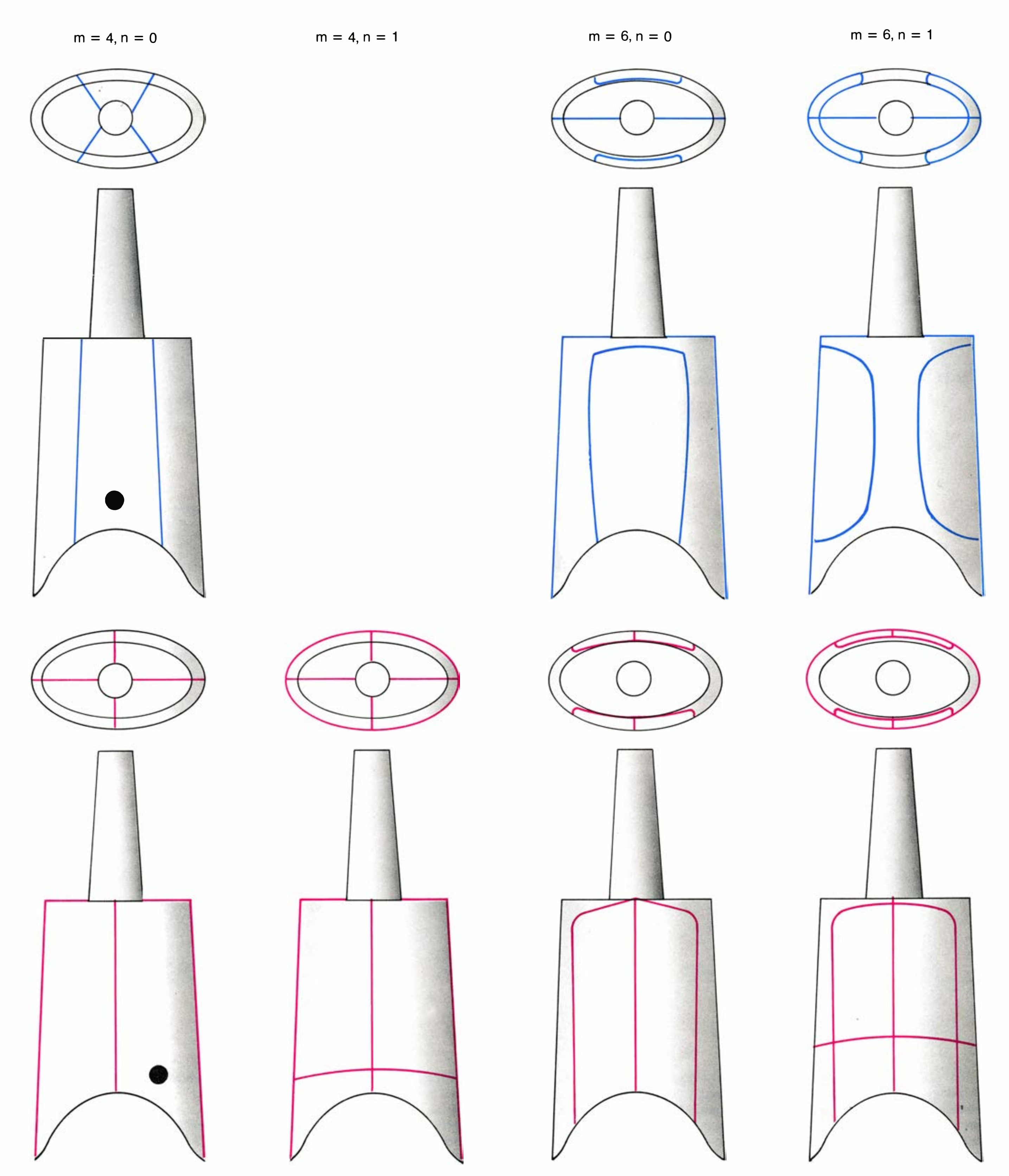
Para situar con tal precisión los meridianos nodales de los dos modos fundamentales, los chinos de la antigüedad tuvieron que poseer conocimientos teóricos de la física de la música muy superiores a lo que solían creer los historiadores. En ese caso, resultaría bastante directo, si bien no muy sencillo, encontrar las posiciones de percusión que separan los fundamentales. Empero, para obtener la mejor resolución entre los tonos, además de las fundamentales deberían separarse los sobretonos. Los meridianos nodales para los principales modos de los sobretonos de la posición *gu* convergen en la posición de percusión *sui*, por lo que no contribuyen al tono *sui*. Sin embargo, los meridianos de los mo-



6. MOVIMIENTO DEL BORDE de la campana después de su percusión. Ilustra sobre la distribución que siguen las líneas nodales en el caso de las campanas redondas (*arriba*) y en los dos tonos de la campana china *zhong*, los denominados coronan a las campanas recuerdan el sistema de enumeración de los radios y muestran los cambios que sufre la forma de la campana después de la percusión. Se representan los modos donde *m* vale 4 y 6, en los cuales los radios nodales de la campana redonda aparecen con un espaciado uniforme y, por consiguiente, sólo permiten un modelo de distribución. En la campana china, sin embargo, y en virtud de su forma ovalada, puede ordenarse un número dado de líneas nodales de muchas maneras: las distintas distribuciones nodales generan tonos diferentes. Según se muestra aquí, el modelo de radios nodales que se genera viene determinado por el punto donde se percute la campana. Los diseñadores chinos lograron maximizar la separación entre los dos tonos *zhong* haciendo que el punto de percusión de uno coincidera con las líneas nodales del otro.

dos de los sobretonos *sui* no se concentran en la posición *gu*, por lo que, al percutir esta posición, podrían interferir en el sonido trazas de parciales *sui*. Y ello explica por qué las campanas *zhong* presentan el labio arqueado.

Cuando examinamos los dos juegos de modos normales, advertimos que el arqueamiento del labio de la campana, además de alterar la forma de la "placa" vibrante, modificaba los diseños nodales de los principales sobretonos *sui*. Debido al arco que formaba el labio, los meridianos de los sobretonos *sui* convergían en el punto donde, no precisamente por coincidencia, se había definido la posición de percusión *gu*. Por regla general se halla a 3/5 de la distancia que separa la posición *sui* de la costura *xian*. El punto de percusión resulta de tal importancia



7. PAUTAS NODALES de los tonos *sui* (*arriba*) y *gu* (*abajo*). Se representan los modos de las fundamentales y los sobretonos más relevantes. Las secciones que coronan a las campanas recuerdan el sistema de enumeración de los radios y círculos en las placas vibrantes. Las líneas horizontales se cuentan como círculos, si bien no contribuyen al sonido y, por tanto, no se tienen en cuenta. Como muestra la figura 10, el tono *sui* posee dos sobretonos principales y, el *gu*, tres.

para que se obtengan el tono y la calidad de sonido correctos que los chinos los inscribieron en las campanas, indicando así de forma inequívoca las posiciones *sui* y *gu*. Ni el diseño del borde cóncavo ni la precisa identificación de la convergencia de las líneas nodales podían ser casuales.

Las puntas *mei*, agrupadas en la parte superior en todas las campanas excepto en las de registro agudo, tampoco son mero ornamento. Compensan la diferencia de intensidad de las dos fundamentales, que resultan equiparables. Más importante aún, los *mei* actúan también de elemento de separación de los dos tonos de la campana. En recientes estudios de laboratorio se ha comprobado que las puntas modifican las estructuras de los sobretonos, o espectros de frecuencias, de los tonos *sui* y *gu*. Los *mei* añaden peso alrededor de la porción superior de la campana, modificando los patrones nodales de esa zona. Por consiguiente, son más acusados en las campanas grandes. Sin *mei*, las fundamentales de *sui* y *gu* se distinguen con facilidad, pero presentan ciertos sobretonos comunes en la banda de las altas frecuencias. Con puntas, las frecuencias de dichos sobretonos se desplazan de tal forma que el solapamiento entre los dos juegos de parciales es escaso.

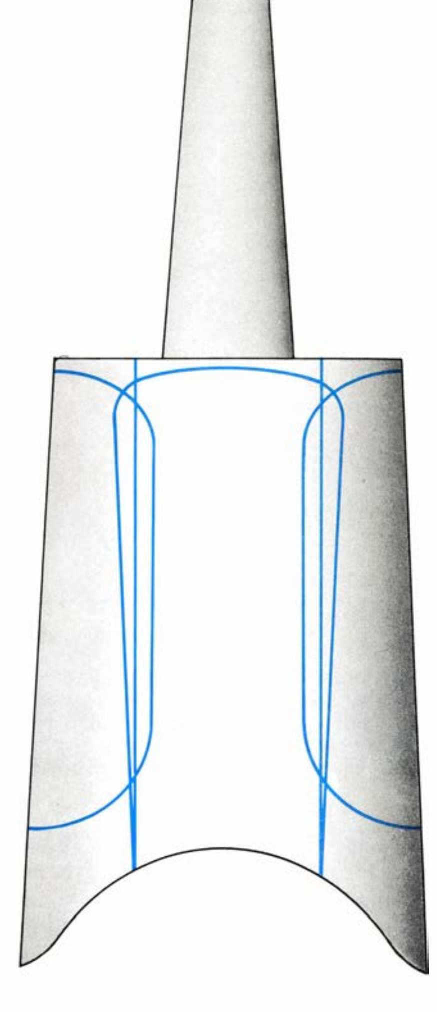
El intervalo que media entre los dos tonos de las campanas *zhong* se selecciona por fundición y por afinación. La elección del intervalo es arbitraria, pero debería acomodarse a la progresión melódica de las composiciones que se interpretan. Además, el intervalo no debe ser disonante, ya que, tras la extinción del tono principal pueden persistir trazas del tono secundario, pese a los esfuerzos de los diseñadores. Los ingenieros zhou afinaron las campanas de suerte que los intervalos de los sobretonos, así como los de las fundamentales, resultaran armónicos. Por ejemplo, el segundo parcial del tono *gu* está siempre una octava más una tercera menor o mayor por encima del tono *sui*; los parciales de una campana *zhong* cuyos dos tonos estén separados por una tercera menor se ajustan a la proporción 1 : 1,2 : 2,4 : 2,81 : 3 y, si la tercera es mayor, a la proporción 1 : 1,25 : 2,5 : 2,81 : 3.

Al comparar los intervalos de los juegos de campanas de varios períodos se observa una tendencia hacia los intervalos de tercera mayor y menor, como es el caso de la colección de campanas del marqués Yi. Careciéndose de ejemplos de música antigua, cabe suponer que esa preferencia se ajustaba a una predilección por las terceras mayores y menores en las composiciones musicales de aquella época. En Europa esos intervalos se consideraron armónicos a partir del siglo XII.

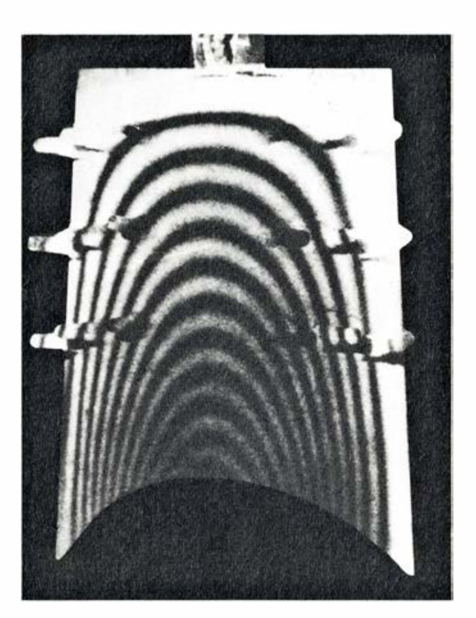
Cuando se descubrió el juego *bianzhong* del marqués Yi, las campanas seguían casi perfectamente afinadas, y ello a pesar de su prolongado enterramiento. Otro juego de 36 campanas, hallado en 1981 en el mismo principado Zeng, se conservaba incluso mejor afinado. Las placas vibrantes suelen afinarse añadiendo o quitando material; sin embargo, se diría que con ese método resulta imposible afinar un tono de una campana de dos sin alterar el otro, pues ambos se encuentran en el mismo cuerpo. ¿Cómo lograban los maestros chinos afinar los dos tonos de una misma campana *zhong*?

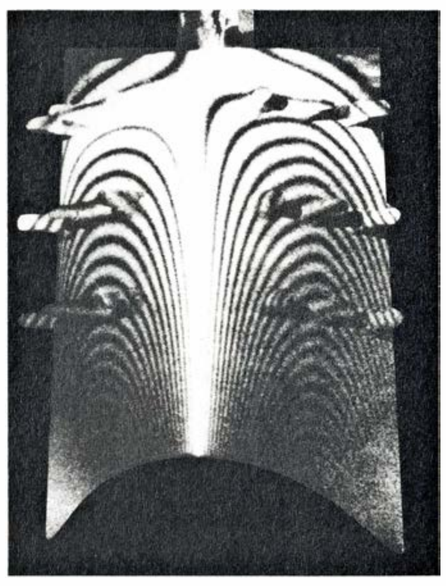
Una vez más, se valían de su extraordinaria destreza en la localización de las líneas nodales. Afinaban un solo tono rascando bronce del interior de la campana, pero cuidando de rascar material según las líneas nodales del otro tono. Así, para afinar el tono *sui* se sacaba material de las líneas nodales *gu*, y viceversa. Por otra parte, muchas campanas se fundían con tal precisión que no requerían luego modificación alguna.

En la antigua China se dominaba las técnicas de fundición de bronce con moldes de barro que correspondían a diversas partes de las piezas. No obstante, la fabricación de una campana

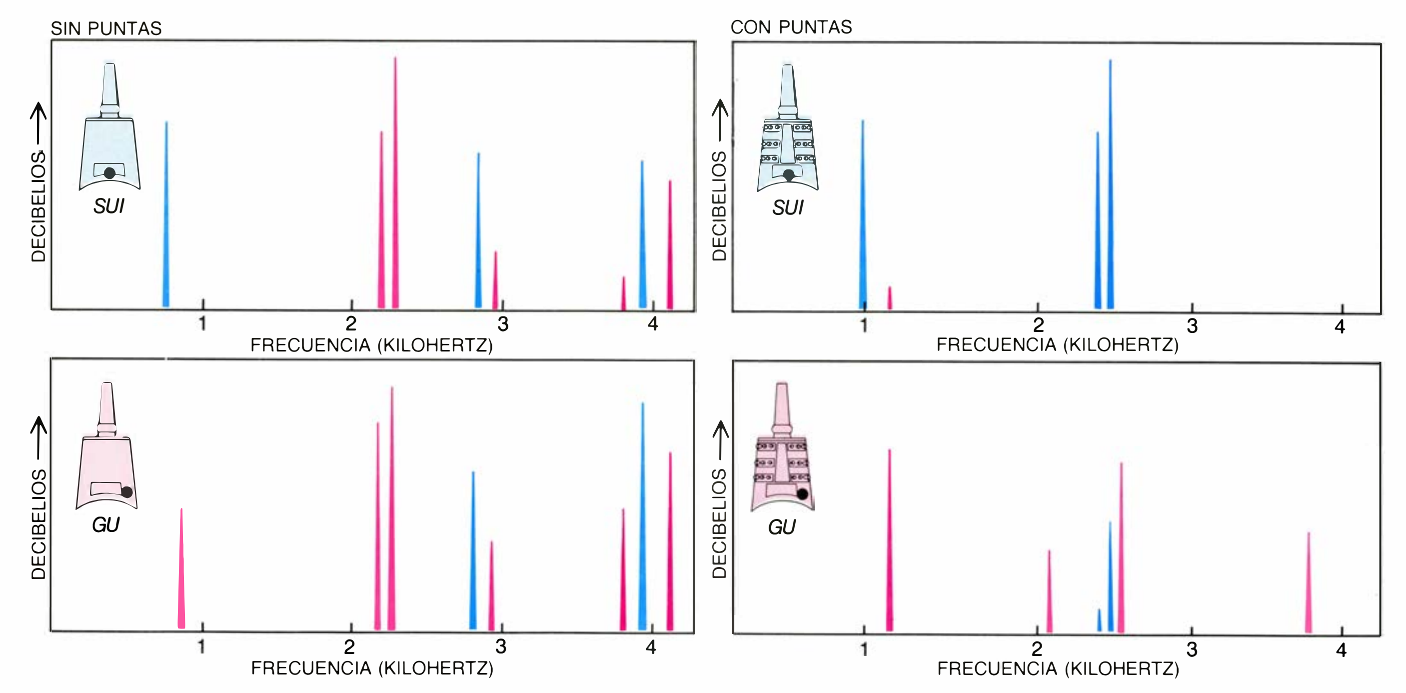


8. CONVERGENCIA de las líneas nodales de los tres parciales principales del tono *sui*, característica importante del diseño de la campana china. Si el perímetro de la campana fuera plano, los nodos *sui* no se intersecarían y la percusión de cualquier punto de la campana excitaría cuando menos un tono *sui*. El arqueamiento del labio de las campanas *zhong* reordena, en cambio, las líneas nodales de tal modo que se concentran en la posición *gu* (*círculo blanco*). Esa convergencia de los nodos depura el tono *gu* de las resonancias *sui* que enturbiarían el sonido.





9. HOLOGRAMAS DE LASER que recogen los modos de vibración de las fundamentales de los tonos *sui* (*izquierda*) y *gu* (*derecha*). Las anchas zonas blancas corresponden a los nodos; las líneas oscuras son sectores de movimiento intenso. Destaca la convergencia complementaria de las líneas nodales. Las imágenes se obtuvieron registrando la reflexión de la luz sobre las superficies quietas y en movimiento de la campana.



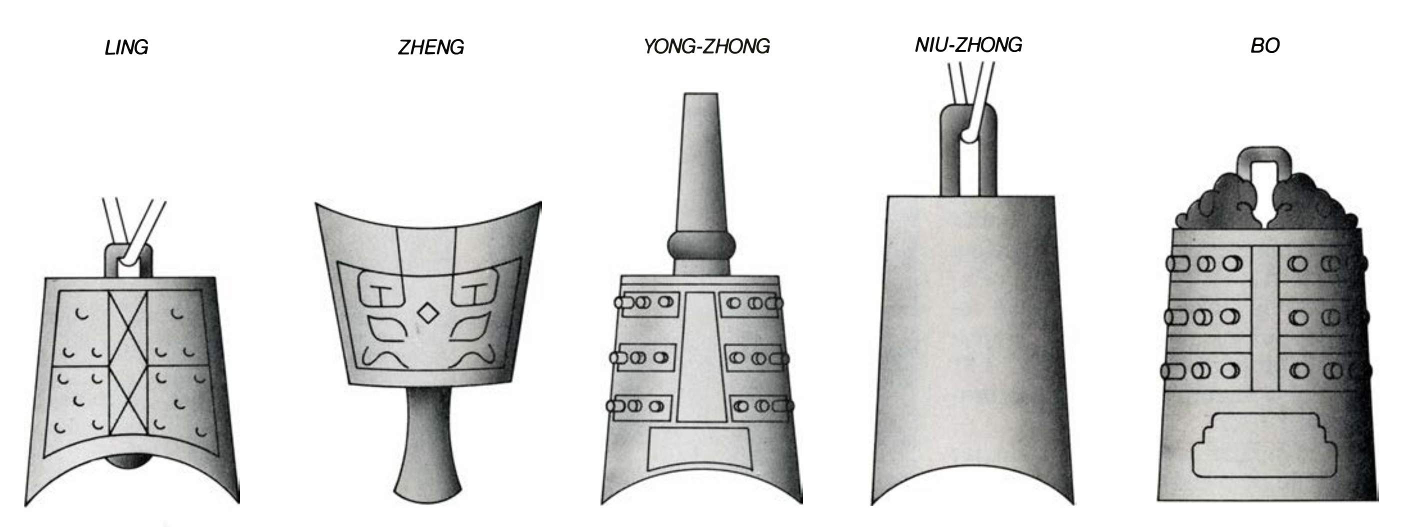
10. GRAFICAS DE LAS FRECUENCIAS DE LOS PARCIALES, que destacan la importancia de las puntas *mei* en la separación de los tonos *sui* (*azul*) y *gu* (*rojo*). Las frecuencias generadas por las campanas sin *mei* (*izquierda*) son casi idénticas en ambas posiciones de percusión. Sólo se distinguen con nitidez las fundamentales. Al añadirse las puntas (*derecha*), se redistribuyen las pautas nodales de la porción superior de la campana, modificándose algunas frecuencias y eliminándose otras. Desaparece casi toda traza del tono *gu* en el espectro del *sui*, y en el de aquél sólo persisten ligeros indicios de parciales de *sui*. Las puntas *mei* sirven igualmente para incrementar la potencia de la fundamental de *gu*, hasta el punto de igualarla con la potencia de la fundamental de *sui*.

zhong de registro grave constituía una tarea formidable. Los objetos grandes y complicados se obtenían fundiendo segmentos, que se unían al final en un molde único. Pero la campana de bronce, sea cual fuere su tamaño, siempre se fundió de una sola pieza.

En el mundo moderno lo más parecido a un juego de campanas chinas es el carillón, formado por un grupo de campanas seleccionadas cuidadosamente para que den intervalos cromáticos equitemperados. Las campanas se tocan por medio de un teclado. Puesto que algunos parciales son disonantes, en el carillón sólo puede producirse un número limitado de acordes, y generalmente se toca una sola melodía. La obtención de efectos satisfactorios exige grandes conocimientos y destreza, e incluso las instalaciones más costosas pueden ofrecer en ocasiones interpretaciones decepcionantes. Si el carillón es lo mejor que puede darnos el presente, ¿cómo diseñaron los chinos el *bian-zhong* hace tanto tiempo?

Desde la antigüedad, los músicos chinos han sido muy sensibles a las diferencias de la calidad tonal; sensibilidad que se manifiesta en muchos de sus instrumentos. Pregunté en cierta ocasión a un músico chino de instrumentos de viento sobre la razón del diseño del *shuang-guan*, un oboe formado por dos oboes cilíndricos aparentemente iguales. Me contestó: "No hay dos tubos con lengüeta que tengan el mismo espectro tonal. Con dos tubos, en el *shuang-guan* el músico controla una mayor variedad de tonalidades y puede ser más selectivo en el timbre".

Quizá fuera esa gran sensibilidad a la estructura tonal lo que instara a los



11. SUCESION HISTORICA de las campanas, que sugiere la trayectoria que siguieron los antiguos maestros chinos hasta llegar al diseño *zhong*. La campana *ling*, la más antigua de las cinco que se muestran, tiene más de 3600 años. Poseía badajo y emitía un solo tono, poco reconocible. La campana manual *zheng* constituye un primer ejemplo del diseño de dos tonos; la utilizaron los soldados chinos, que la llevaban boca arriba. También la *niu-zhong* emitía dos tonos, si bien en los registros graves carecía de la claridad de la popular *yong-zhong*. Son *niu-zhong* las campanas de la hilera superior del juego que se muestra en la figura 5. Otro contemporáneo de las *zhong*, el *bo*, se utilizaba como instrumento ceremonial y emitía un solo tono. Las campanas no se han representado a escala.

antiguos chinos a experimentar con un diseño de campana ligeramente elíptico, que genera un juego de modos vibratorios más completo y ofrece mayores posibilidades de obtener sobretonos. Las campanas *ling*, reliquias del primitivo período Shang, aun siendo ovaladas, poseían badajo y sólo producían un tono. De su carácter musical nos da prueba su uso como esquilas para perros y vacas.

En esfuerzos posteriores los chinos debieron batallar con campanas ovaladas, que, si bien producían dos tonos distintos, emitían sonidos extraños o poco definidos. Las campanas de mano *zheng*, ovaladas y grandes, anteriores en varios siglos al juego de campanas, constituyen un ejemplo de ese estadio de desarrollo. En efecto, las *zheng* dieron nombre a la mitad superior de las campanas *zhong*; el saliente *yong*, que sostiene la campana *zhong* en un plano inclinado 30 grados, deriva del mango *zheng*. Sin embargo, la campana *zheng* sin badajo genera un sonido *gu* poco definido, porque su boca aplanada no fuerza la convergencia de las líneas nodales *sui*.

Modificando la superficie, la sección transversal y el grosor de la campana, los dos tonos se situaron en una relación armónica bien definida, hasta que despuntó su individualidad y, en última instancia, nació el complejo diseño *zhong*. Entre los contemporáneos de las campanas *zhong* se cuentan la *niuzhong*, que también emite dos tonos, y el *bo* ceremonial, que carece de la agilidad musical del *zhong*. Ambos tipos de campana se tocan en posición vertical.

La historia del arte musical es larga y distinguida, y ha corrido paralela al desarrollo de la civilización humana. Los principios que se encarnan en el juego de campanas Zenghou Yi sugieren que la historia de la musicología quizá sea no menos dilatada y prominente. En los períodos Shang y Zhou, China había alcanzado un elevado nivel de conocimientos acústicos, que resultó decisivo para el desarrollo del complejo arte musical de aquellas épocas. Física e ingeniería se complementaban en el perfeccionamiento de los instrumentos de viento, de cuerda y de percusión, así como en la formación de la orquesta. Tales logros encuentran ejemplos vivos en los tiempos actuales, en tanto que el diseño global de un gran juego de campanas de dos tonos para la interpretación de música constituye un logro sin par en la moderna física de la música.

El gen de la histona *H*1

Un gen que codifica la proteína responsable de la organización espacial de la cromatina y condiciona el estado de diferenciación de cada tipo celular

Jovita Mezquita Pla

El ADN contiene, escrita en un alfabeto de cuatro letras, la información necesaria para que las células se desarrollen y dividan. La molécula de ADN proporciona, además, la base del proceso evolutivo que ha generado la ingente variedad de formas vivas que conocemos. El descubrimiento por James Watson y Francis Crick, en 1953, de la estructura en doble hélice del ADN permitió comprender de qué manera esta molécula almacenaba la información genética y cómo podían producirse múltiples copias de tal información.

Cada una de las cuatro piezas básicas que constituyen la molécula de ADN, denominadas nucleótidos, contiene una de las cuatro bases nitrogenadas siguientes: adenina (*A*), citosina (*C*), guanina (*G*) y timina (*T*). Los nucleótidos se unen entre sí a través de dos tipos de enlaces: los enlaces covalentes fosfodiéster, que engarzan las posiciones 5′ y 3′ de dos nucleótidos formando una cadena, por ejemplo, 5′-*ATGCAATTAGCG*-3′, y las uniones no covalentes por puentes de hidrógeno entre las bases *A-T* y *C-G*, que acoplan la cadena constituida a otra complementaria; siguiendo con el ejemplo anterior, sería 3′-*TACGTTAATCGC*-5′. A través de estos enlaces, los nucleótidos van creando la doble cadena de ADN, que adopta una conformación helicoidal. En la cadena de nucleótidos hallamos escrita la información necesaria para programar el crecimiento y la diferenciación de las células. Cuando la doble cadena se abre al romperse los puentes de hidrógeno, la información codificada en las secuencias de nucleótidos puede copiarse y llevarse a término.

El tamaño de la molécula de ADN de doble hélice, variable, se cuenta incluso por miles de millones de nucleótidos. Para acomodar una molécula de esas dimensiones en un volumen limitado como el del núcleo celular resulta imprescindible empaquetarla de una forma sumamente compacta. El empaquetamiento deberá ser, al propio tiempo, reversible a fin de que, en cualquier momento, la información contenida en determinadas secuencias sea accesible a los mecanismos de copia que conlleva la expresión genética.

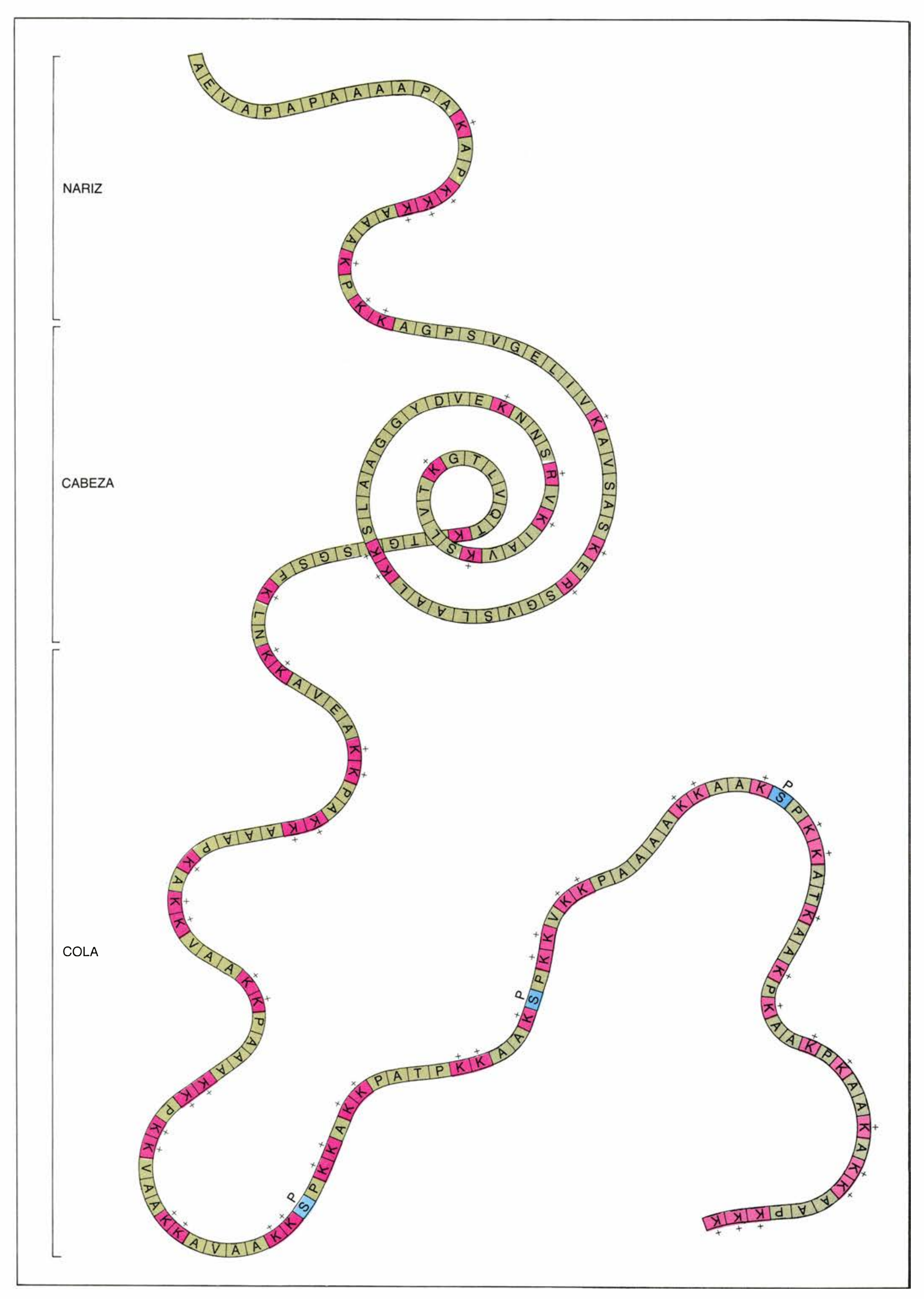
El empaquetamiento de la molécula de ADN en el núcleo celular corre a cargo de las histonas. Estas proteínas básicas forman con el ADN un complejo que en las preparaciones histológicas teñidas destaca por su aspecto coloreado, por cuya razón recibe el nombre de cromatina, que está constituida por ciertas unidades denominadas nucleosomas. Constan éstos de ocho moléculas de histonas –un par de cada uno de los cuatro tipos siguientes: *H*4, *H*3, *H*2A y *H*2B– y un segmento de ADN que las envuelve dando un par de vueltas a su alrededor. Una quinta histona, la *H*1, de mayor tamaño que las anteriores, sella el par de vueltas que el ADN describe en torno a las histonas restantes y organiza a los nucleosomas en una estructura de orden superior: en la superestructura de la cromatina.

El carácter regular y la alta precisión con que las histonas organizan el ADN en los nucleosomas quedan reflejados en la rigidez evolutiva con que se ha conservado la secuencia de esas proteínas. La superestructura de la cromatina varía en mayor medida que la subestructura nucleosómica, lo que posiblemente tenga que ver con una mayor flexibilidad en el mantenimiento de la secuencia de la histona *H*1 a lo largo de la evolución.

Las histonas *H*1 presentan una conformación caracterizada por un dominio globular, la "cabeza", y dos extremos extendidos, la "nariz" y la "cola". La variación evolutiva de la histona *H*1 se refleja principalmente en los extremos de la molécula, que se distinguen por su alto contenido en restos de lisina. Este aminoácido confiere a los extremos de la molécula un carácter policatiónico que es el responsable de su conformación desplegada y de su capacidad para interactuar con el ADN. La sustitución de lisinas por arginina, otro aminoácido de tamaño similar y asímismo dotado de carga positiva, aunque interactúa más intensamente con el ADN, confiere a las variantes de *H*1 un mayor poder condensante.

Cuando se afirma que las histonas *H*1 se unen al ADN cooperativamente se quiere indicar que la unión de una molécula de *H*1 está altamente favorecida si antes se ha engarzado en la molécula de ADN otra histona *H*1. La cooperación posibilita que un determinado dominio del ADN se repliegue o expanda súbitamente. La expansión de un dominio es necesaria para la activación genética. La condensación del ADN provocada por las histonas *H*1 puede intensificarse con la fosforilación de estas moléculas, fenómeno que se ha observado durante el proceso de división celular, a lo largo del cual un segmento de ADN de cinco centíme-

1. CONFORMACION DE LA HISTONA *H*1. Esta proteína está constituida por una cabeza de conformación globular, que apenas ha sufrido cambios a lo largo de la evolución, y por dos extremos: la nariz y la cola. Más variables en su evolución, las dos últimas adoptan una conformación extendida; predominan en éstas los aminoácidos de carga positiva (lisinas). En la cola se encuentran las tres serinas, susceptibles de fosforilarse. En el esquema de la derecha se detalla la secuencia de aminoácidos de la molécula histónica, simbolizados con una letra: A, alanina; E, ácido glutámico: V, valina; P, prolina: K, lisina; G, glicina; S, serina; L, leucina; I, isoleucina; R, arginina; Y, tirosina; D, ácido aspártico; N, asparagina; T, treonina, y Q, glutamina. Los aminoácidos con carga positiva se destacan en rojo y las serinas fosforiladas, en azul.


NARIZ
CABEZA
COLA

tros, por ejemplo, viene a recluirse en cinco micrometros. El aminoácido fosforilado es la serina, resto situado estratégicamente en los dominios terminales de la histona *H*1. La fosforilación permitiría el entrecruzamiento mediante interacciones electrostáticas de dichos dominios terminales.

La función de las histonas *H*1 podría regularse a través de modificaciones químicas de estas moléculas –pensemos en la fosforilación mencionada– y por histonas *H*1 con diferentes secuencias de aminoácidos. La cromatina de células distintas o diferentes dominios de la cromatina de una misma célula podrían contener variantes específicas de la histona *H*1. Esta posibilidad viene avalada por los hechos siguientes: la *H*1 es la histona que ha desarrollado una más amplia variabilidad a lo largo de la evolución; se han observado variantes de esa histona durante la diferenciación celular, en respuesta a la estimulación hormonal y en células transformadas; existen variantes extremas específicas, como la *H*5, *H*1o y la *H*1t, en células que no se dividen, y, por último, hay variantes mínimas, detectadas en proporciones cambiantes, en diferentes tejidos.

Conocemos esa extensa variabilidad de las histonas *H*1 merced a los análisis electroforéticos y cromatográficos, que ponen de manifiesto diferencias en el tamaño y en la carga de estas proteínas. Ante la dificultad que implica verificar dicha variabilidad mediante la determinación de la secuencia de aminoácidos, nos propusimos caracterizar las variantes de la *H*1 analizando la secuencia de sus genes. Ello permitiría, además, el estudio de las secuencias que regulan la expresión genética de esta proteína.

Gracias a la introducción de las técnicas de ingeniería genética y recombinación bacteriana se ha avanzado extraordinariamente en el conocimiento de las secuencias de ADN y del significado de las mismas. Llamamos gen al segmento de ADN que contiene la información necesaria para copiarse en una secuencia de ARN (transcripción) que, a su vez, dará lugar, en muchos casos, a una secuencia de aminoácidos, es decir, a un péptido o a una proteína; este último proceso recibe el nombre de traducción.

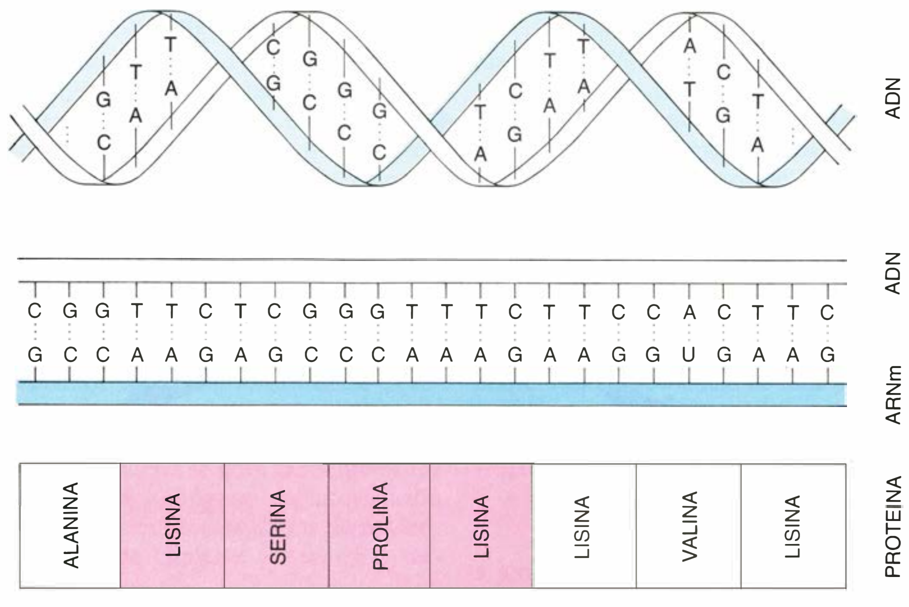
Igual que el ADN, el ARN es un polímero lineal de nucleótidos; distínguese de aquél, sin embargo, en que posee la base uracilo (*U*) en el lugar de la base timina y en contener ribosa en vez de desoxirribosa. La secuencia del ARN, formada con las bases *A*, *U*, *C* y *G*, surge de la copia de determinados segmentos del ADN de acuerdo con el principio de complementariedad: *A* se copia en *U, T* en *A*, *C* en *G y* ésta en *C*. Para ello, la doble hélice se abre en sus dos hebras componentes, una de las cuales se copiará en ARN. Terminada la fase de transcripción, o copia, el ADN torna a enhebrar la doble hélice, en tanto que el ARN permanece en su configuración de cadena única. El ARN podrá dar lugar a la síntesis de una proteína en el proceso de traducción, en el que cada triplete nucleotídico o codón se encarga de la incorporación de un aminoácido, estableciéndose así una secuencia de aminoácidos o proteína.

En el genoma, los genes pueden encontrarse aislados, y se transcriben por separado, o bien encontrarse en un determinado dominio, transcribiéndose conjuntamente. Otras veces, los genes se presentan reunidos formando un conjunto, y cada gen del conjunto se transcribe por separado, aunque puedan hacerlo de una manera coordinada. Los genes de las histonas se disponen en el genoma formando un conjunto o "cluster".

Las investigaciones que condujeron a la determinación del gen de la histona *H*1 las llevamos a cabo en el departamento de bioquímica médica de la Universidad de Calgary, bajo la dirección del profesor Gordon H. Dixon. El modelo utilizado fue la trucha arco iris (*Salmo gairdnerii*). Junto a la determinación de la secuencia del gen de la histona *H*1 abordamos un proyecto más amplio, en colaboración con Wayne Connor y Robert J. Winkfein, del mismo laboratorio, en el que secuenciamos un segmento del genoma de la trucha que contenía el conjunto de los genes de las histonas.

Nos servimos de una genoteca de trucha construida en el vector lamba Charon 4A. (Una genoteca es una colección de fragmentos de ADN representativos del genoma entero, insertados en un vector, que suele ser un fago capaz de replicarse en una bacteria y multiplicar así el ADN introducido.) Utilizando enzimas de restricción, enzimas que reconocen secuencias de cuatro a seis pares de bases, se puede cortar el ADN genómico y el ADN del fago, para reconstruir luego moléculas híbridas del fago con cada uno de los fragmentos del genoma.

Estas moléculas híbridas de genoma y fago pueden empaquetarse *in vitro* y construir así partículas viables de bacteriófago que, en presencia de células bacterianas en cultivo, se multiplicarán produciendo círculos claros, las placas de lisis, que destacan de entre las zonas de bacterias intactas. De este modo se puede disponer de un número de placas de lisis que, en conjunto, representa la genoteca. Cada placa de lisis contiene moléculas recombinantes idénticas o clones. Por simple contacto de estas placas con un

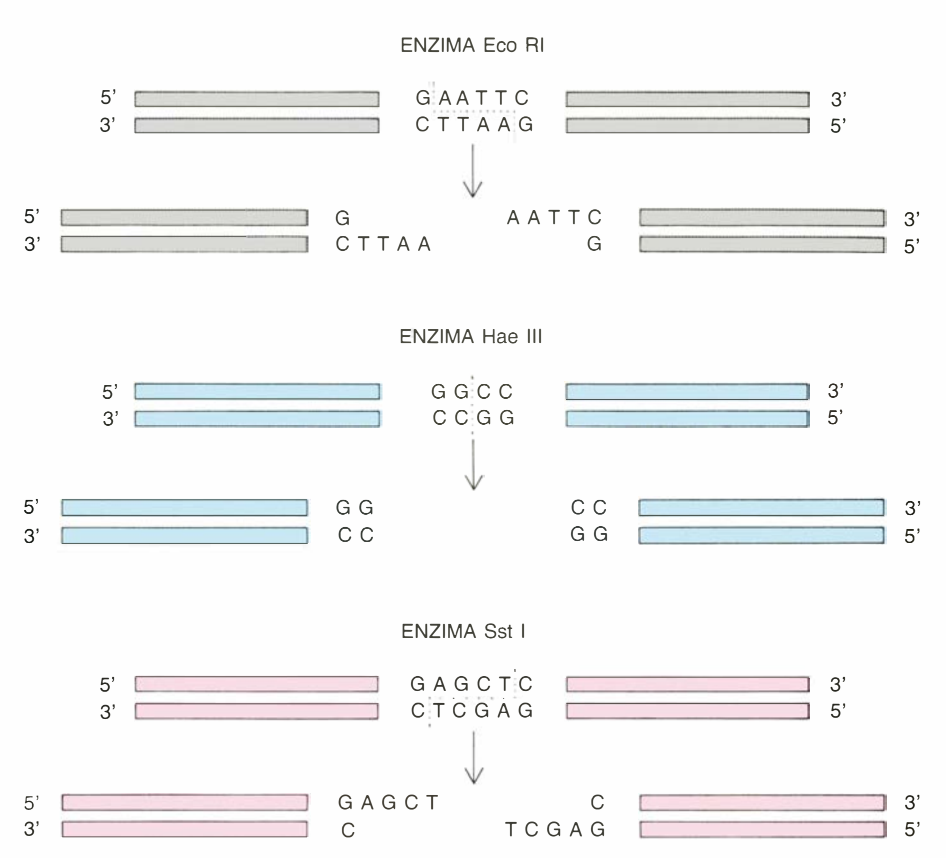


2. DOBLE HELICE DE ADN con sus nucleótidos complementarios unidos por enlaces de hidrógeno. Ciertos segmentos de ADN se transcriben en moléculas de ARN. Algunas de éstas, los ARNm, dan lugar, por traducción, a moléculas proteicas. Cada tres nucleótidos sucesivos (codón o triplete) determinan un aminoácido. La figura ilustra parte de la secuencia del gen de la histona H1 de la trucha, su transcripción y su traducción en proteína. En rojo se destaca un pentapéptido que se repite tres veces en la secuencia de la histona.

filtro de nitrocelulosa o con una membrana de nylon se puede transferir suficiente cantidad de ADN para proceder a la selección de clones de interés, en nuestro caso clones portadores de genes de histonas. La selección se realiza por hibridación del ADN, desnaturalizado previamente (es decir, con sus dos cadenas separadas), con fragmentos de ADN, también desnaturalizados, que tengan el suficiente grado de complementariedad: son las llamadas sondas. La genoteca de trucha se hibridó inicialmente con una sonda del gen H4 de *Xenopus*; dado que esta histona se ha mantenido casi inalterada a lo largo de la evolución biológica, cabía esperar que la homología en el ADN fuese estrecha.

Con esta sonda se detectaron 35 clones positivos. Se multiplicó una docena de ellos para preparar ADN y caracterizarlo. Se empezó por construir el mapa de restricción de cada ADN. Las enzimas de restricción permitían localizar las secuencias por ellas reconocidas. Las enzimas más útiles para construir el mapa de restricción eran las que cortaban pocas veces, esto es, las que reconocían secuencias de ADN poco frecuentes. Con cada enzima, o mediante la combinación de dos, se digería el ADN (es decir, se fragmentaba) y se determinaba en geles de agarosa el tamaño de los fragmentos producidos. En esos geles, la movilidad depende del tamaño y se expresa en pares de bases (*pb*) o en miles de pares de bases (kilobases, *Kb*). Para determinar esos tamaños se separaban paralelamente, en la misma electroforesis, fragmentos de ADN de tamaño conocido (marcadores).

Las bandas de ADN separadas se visualizaban con luz ultravioleta, después de teñir el gel con bromuro de etidio. Averiguado el tamaño de los fragmentos generados por las enzimas de restricción, se construyó el mapa por superposición de los mismos. Para determinar el mapa de restricción de los clones que presentaban los genes de las histonas se utilizaron las enzimas *Eco R1*, *Bam H*1, *Xho*1 y *Sst*1. Los resultados pusieron de manifiesto que había una gran parecido en la organización de estos clones, con identidad en el mapa de restricción en una extensión de 10 kilobases. Uno de los clones, el lambda *TH*3 difiere algo, y a él nos referiremos más adelante.



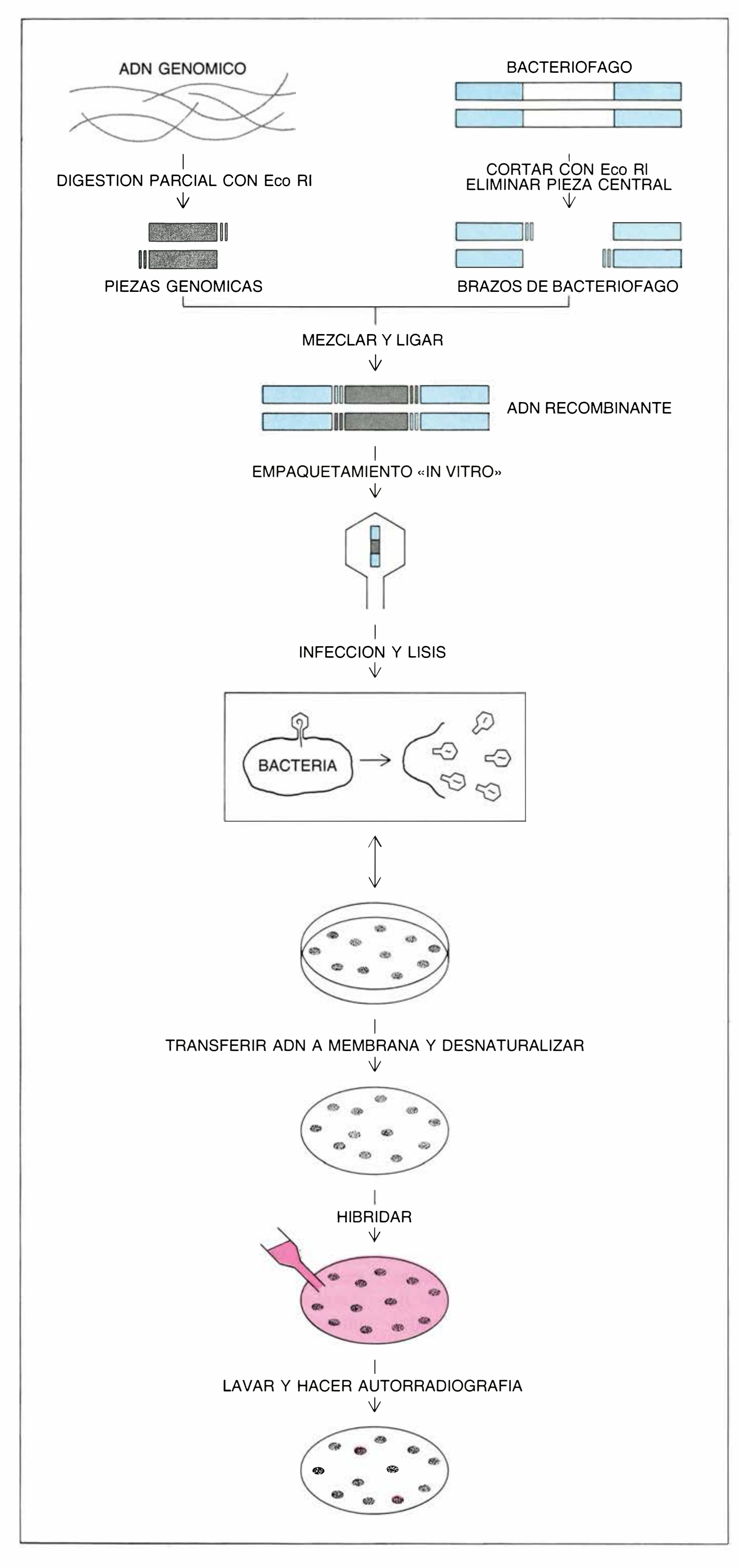
3. ACCION DE LAS ENZIMAS DE RESTRICCION sobre la molécula del ácido desoxirribonucleico. Esas enzimas reconocen secuencias cortas, de cuatro a seis pares de bases sucesivas (*azul*). La secuencia reconocida por la enzima se fragmenta de forma simétrica o asimétrica; en el último caso, se generan extremos de cadena simple. La figura recoge las secuencias reconocidas y cortadas por las enzimas: EcoR1, Hae III y SstI. La enzima EcoR1 genera un extremo 5′ libre, mientras que la enzima Sst1 da lugar a un extremo 3′ libre.

Vayamos al segundo paso en la caracterización. Consistió en determinar la localización exacta de cada gen de las histonas dentro del conjunto. Sondas construidas con genes de histonas de *Xenopus*, erizo de mar y *Drosophila* resultaron adecuadas para la localización de los genes H3, H4 y H2B. El gen H1 oponía una dura resistencia a su localización con una sonda de un gen H1 de *Drosophila*. Variando la temperatura o la concentración, o ambas, durante la hibridación y el lavado, lográbase modificar la unión de la sonda con secuencias sólo parcialmente complementarias. Realizando la hibridación a temperaturas bajas de 37 a 40 grados C y a una fuerza iónica elevada (0,9 molar), y lavando posteriormente a temperatura ambiente y sin disminuir la concentración de sal, la hibridación de la sonda resultaba ser mayor, aunque se corría el riesgo de que se uniera a secuencias poco específicas. Era una situación típica de estrigencia baja de la hibridación.

La hibridación de fragmentos del clon lambda *TH*2 con la sonda H1 de *Drosophila* mostraba un resultado que variaba desde la ausencia de bandas en condiciones de relativa estringencia hasta la aparición de varias bandas positivas cuando se reducía la estringencia. Para ver si los fragmentos positivos contenían el gen H1, secuenciamos los que hibridaban con mayor intensidad; ante nuestra sorpresa, observamos que estábamos secuenciando el gen H2A, todavía no localizado. La localización del gen H1 se consiguió finalmente con una sonda H1 de tritón.

En todos los clones se encontraron las cinco histonas, en el siguiente orden: *H*4-*H*2B-*H*1-*H*2A-*H*3, orientadas en el mismo sentido. El que la orientación de los genes sea la misma significa que la información que codifican, a diferencia de lo que ocurre en otros conjuntos de genes de histonas, se halla en la misma cadena de ADN.

Para la secuenciación de estos genes, que constituían un total de 7000 pares de bases, se siguió el procedimiento de Maxam y Gilbert, que explicaremos inmediatamente. A tal fin hubo que volver a clonar determinados fragmentos de ADN en un vector distinto del lambda Charon 4A. La secuencia se obtuvo a partir del clon lambda TH2, que contiene el conjunto de genes de las histonas en un fragmento del genoma, de unas diez kilobases, inserto en un vector de unas 30



Kb. Para la secuenciación era conveniente simplificar la complejidad de ese sistema y reconstruir moléculas recombinantes en que tanto el ADN insertado como el vector tuviesen tamaños mucho menores.

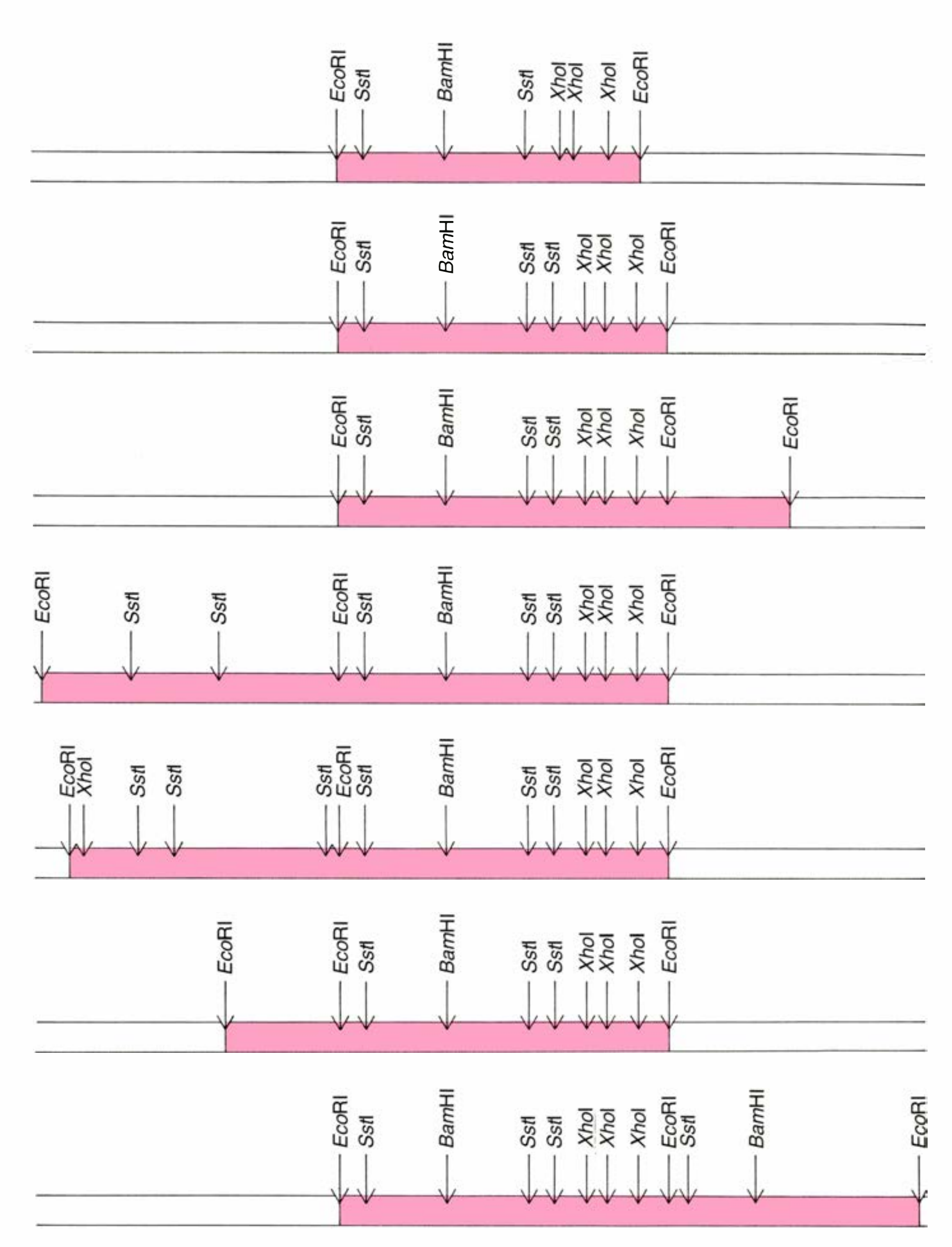
Seleccionamos, con enzimas de restricción, fragmentos de parte o de la totalidad de cada gen. Tales fragmentos, que se obtenían como moléculas biológicamente activas a partir de geles de agarosa, se introdujeron en un vector pequeño, de unas cuatro kilobases: el vector pBR322. Se trata de un plásmido capaz de replicarse en una bacteria con independencia del genoma de esta última. Contiene, además, una secuencia que le confiere resistencia a la penicilina, y que nos permitía seleccionar las bacterias que transportaban el plásmido o el híbrido recombinante, ya que en presencia de penicilina no crecen las demás bacterias. De esta forma se multiplicaron las moléculas recombinantes en un vector pequeño, consiguiéndose cantidades de ADN del orden de miligramo. Para la inserción de los fragmentos de interés en el vector, los extremos de ambos ADN han de disponer de terminaciones compatibles, generadas con enzimas de restricción. En las construcción de subclones H1 no siempre lográbamos que la enzima cortase el fragmento de interés y el vector. Recurríamos entonces a los ligadores ("linkers"), moléculas de una decena de pares de bases que se acoplaban a los extremos del ADN y que contenían el sitio de restricción adecuado.

El método de secuenciación de Maxam y Gilbert comprende varias etapas. La primera consiste en cortar el ADN con una enzima de restricción que produzca extremos 5′ que se proyecten libres, como en el caso de *EcoR*1. Conviene que el grupo 5′ fos-

4. CONSTRUCCION DE UNA GENOTECA y aislamiento, a partir de la misma, de clones que contienen secuencias específicas. La parte central de la molécula de ADN del bacteriófago lambda es sustituible por fragmentos de ADN genómico, de tamaño comprendido entre 10 y 20 kilobases. La molécula recombinante que resulta puede empaquetarse *in vitro*; es decir, en presencia de proteínas específicas que forman una cápside, el ADN dará lugar a partículas del bacteriófago lambda y podrá infectar una bacteria. Una vez introducido el ADN en la bacteria, se multiplicará allí por replicación, produciéndose múltiples copias de ADN y partículas víricas que matarán la bacteria por lisis. Cada bacteria es infectada por un solo bacteriófago y, según la proporción de bacterias infectadas, se formará un número variable de placas de lisis. Las placas de lisis que alojan clones de interés se identifican por autorradiografía, después de desnaturalizar el ADN, transferirlo a una membrana e hibridarlo con la sonda pertinente.

fato se proyecte libre para el desarrollo de las reacciones que se suceden a continuación; en efecto, su rendimiento cae drásticamente cuando el fosfato 5′ queda dentro de la doble cadena de ADN; las reacciones en cuestión son dos: una defosforilación a cargo de una fosfatasa que elimina el grupo fosfato y una fosforilación que incorpora fósforo radiactivo P32 a partir de ATP(P32) y una enzima quinasa. Se producen así dos extremos marcados radiactivamente, uno de los cuales se elimina con una segunda enzima de restricción. El ADN, marcado en un solo extremo, se reparte en cuatro muestras, cada una de las cuales se procesará con un reactivo químico que destruye, selectivamente, una o dos bases de ADN.

Se controla el tiempo de la reacción, en general intervalos breves de varios minutos, para que las reacciones sean parciales y se produzca una proporción adecuada de cada tipo de modificación posible. Sólo los fragmentos que conecten con el extremo radiactivo aparecerán en las autorradiografías, con lo que el proceso queda simplificado a lo que ocurra a tales fragmentos marcados. Los fragmentos complementarios se separan por desnaturalización. Separando por electroforesis en gel de poliacrilamida los productos de las cuatro reacciones químicas, se pueden observar bandas escalonadas, que difieren una de otra en un solo nucleótido. Para determinar la secuencia, se leen las bandas sucesivas equivalentes al nucleótido modificado en cada carril. La resolución con que se separan los fragmentos disminuye al aumentar su tamaño. Para secuenciar el gen H1 entero por este procedimiento hubo que ampliar su mapa de restricción a fin de disponer de sitios adecuadamente localizados.



5. MAPA DE RESTRICCION de los clones con genes de histonas, en este caso genes de histonas de trucha. Se muestra la localización de las secuencias reconocidas por las enzimas EcoR1, BamH1 y Xho1. Obsérvese la identidad en el mapa de restricción de la región EcoR1-EcoR1 central que contiene los genes de las cinco presenta ciertas diferencias, como es la ausencia de una de las secuencias de Sst1; viene, a continuación, el presenta ciertas diferencias, como es la ausencia de una de las secuencias de Sst1; viene, a continuación, el clon lambda TH2, a partir del cual se secuenciaron los genes de las histonas; por último, se ofrecen otros clones, que se caracterizan por contener, en los extremos, fragmentos EcoR1-EcoR1 adicionales.

¿Cuáles son las características estructurales del gen H1 secuenciado? La secuencia de aminoácidos deducida del gen consta de 206 restos, distribuidos en los tres dominios estructurales típicos de estas proteínas; abundan las lisinas y alaninas y escasean las argininas. Al parecer, un contenido alto en lisinas (63 en esta *H*1) y bajo en argininas (un par) resulta fundamental para ciertas *H*1, mientras que en otras variantes lo característico es lo contrario, una mayor proporción de argininas y menos lisinas.

En este gen, de las 63 lisinas, 57 están determinadas por el triplete *AAG* y sólo seis por el triplete *AAA*, el otro codón de lisina. Bastaría sustituir el nucleótido central (*AAG* por *AGG* o *AAA* por *AGA*) para obtener un triplete de arginina: *AGG*, *AGA*. El hecho de que, no obstante la fácil sustitución de un triplete por otro, se mantenga el codón de lisina en esta *H*1 abona la hipótesis de una fuerte selección en favor de la lisina en un grupo de histonas *H*1. Asímismo, sugiere que ambos aminoácidos, lisina y arginina, aunque muy similares en tamaño y carga, deben cumplir una función muy distinta en su interacción con el ADN en la cromatina. En el extremo final de la molécula hallamos, triplicada, la secuencia lys-ser-pro-lys-lys, pentapéptido cuyas serinas se fosforilan durante el proceso de división celular.

En un gen eucariota, la región codificadora de una secuencia de nucleótidos se inicia siempre con el triplete *ATG*, equivalente al aminoácido metionina, y acaba con un triplete de terminación: *TAA*, *TAG* o *TGA*. En el gen H1, el codón de terminación es *TAA*. Por delante y por detrás de esta región codificadora se hallan las secuencias reguladoras. En el gen H1, 127 pares de bases antes del codón metionina (posición -127) se encuentra la secuencia *TTTAA*, que sería el equivalente a una secuencia promotora (*TATAA*) de otros genes. Estas secuencias, reconocidas por la enzima ARN polimerasa II –responsable de la

transcripción del ADN–, dirigen a dicha enzima, con precisión, hacia el lugar donde se iniciará la transcripción y garantizan que esto ocurra de forma eficiente.

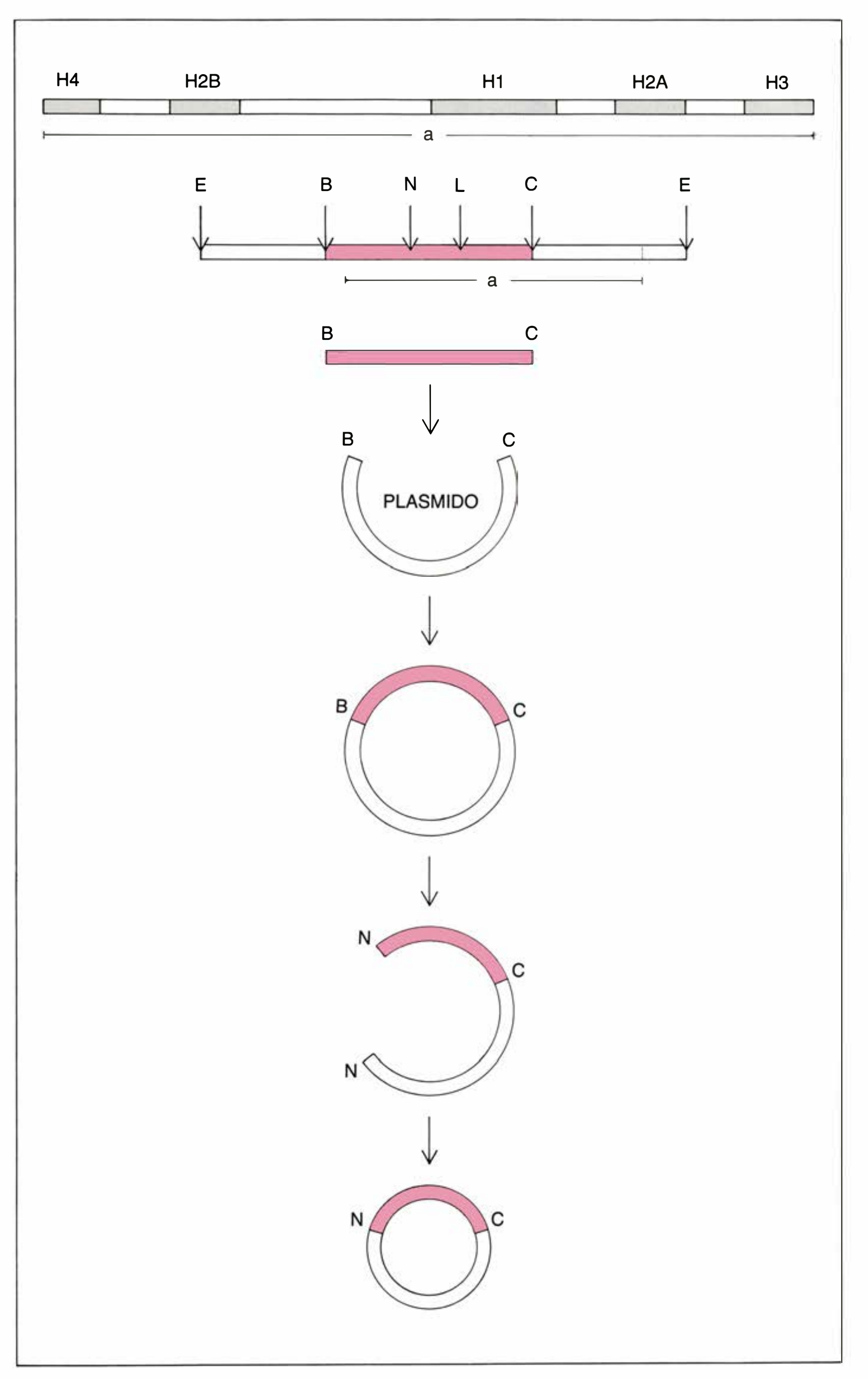
Se desconoce la repercusión exacta que pueda tener en esta secuencia la sustitución de una *A* por una *T*, aunque no se descarta que afecte al rendimiento de la transcripción. En la posición -31 se ubica la secuencia alternante repetida *GTGTGTGTGTTT*, cuyo significado se desconoce. La secuencia *AAACACA*, descrita como elemento específico de los genes H1 por L. S. Coles y J. R. E. Wells, aparece dos veces en este gen H1, en las posiciones –206 (aga*AAACACA*ag) y –733 (aaga*AAACACA*ca)).

La transcripción del gen H1 comienza con la secuencia *AATAG* en posición -93. Este sitio de iniciación u origen del ARN se determina preparando piezas genómicas complementarias a la región 5′ del ARNm. Las piezas preparadas eran de dos tamaños: las pequeñas, de unos 100 nucleótidos, no sobrepasaban el origen del ARNm (fragmento 1); las más largas sobrepasaban dicho origen (fragmento 2). Ambos fragmentos se marcaron en su extremo 5′. En el caso de fragmento 1, la pieza se extendió con la enzima transcriptasa inversa hasta alcanzar el origen del ARNm. En el caso del fragmento 2, la pieza se cortó con nucleasa S1, enzima que actúa sobre el ADN de cadena única y, por consiguiente, digería el ADN que rebasaba el sitio de iniciación. El segmento final de ADN, obtenido en ambas condiciones, se caracterizó en geles de acrilamida, visualizándolo por autorradiografía.

Al igual que ocurre en los otros genes de las histonas, inmediatamente después de la región codificara se halla la secuencia 5′-*GGCTCTTTTAAGAGCCAC*-3′, formada por dos mitades complementarias entre sí. Dicha secuencia señala la terminación del ARNm. A una distancia de 15 y 28 nucleótidos encontramos, respectivamente, las secuencias *AAAAGC* y *ATTCCA*, esta última duplicada. El ARNm del gen H1 se transcribiría sobrepasando todas estas secuencias, hasta una longitud desconocida, para ser luego procesado, es decir, cortado, a través de un mecanismo en el que estas secuencias servirían de señales de reconocimiento.

¿Se transcribe el gen H1 *in vivo*? Los estudios que realizamos con ARNm procedentes de extractos hepáticos, renales y testiculares, separados de acuerdo con su respectivo tamaño en geles de agarosa y transferidos a una membrana de nylón, mostraron, tras hibridarlos con la sonda del gen H1, una sola banda; ésta destaca en el extracto gonadal, es mucho menos intensa en el riñón y resulta mínima en el extracto de tejido hepático. Tales datos señalan que no existe heterogeneidad en lo relativo a tamaños moleculares, o bien que, si hubiera ARNm del gen H1 de distinto tamaño, éstos no hibridarían con la sonda utilizada.

Ante los hechos observados cabe preguntarse sobre el posible polimorfismo del gen H1 en la trucha arco iris. Entre las variantes reseñadas de *H*1, al-



6. CONSTRUCCION DE SUBCLONES a partir de fragmentos de ADN del clon lambda TH2. En la parte y *H3*; debajo de los mismos, uno de los fragmentos seleccionados para la construcción de subclones del gen y *H3*; debajo de los mismos, uno de los fragmentos seleccionados para la construcción de subclones del gen de la histona H1. En uno de esos subclones, el fragmento B-C (BamH1-Cla1) se insertó en los sitios de restricción BamH1 y Cla1 del vector pBR322. Otro de los subclones se construyó a partir de este último, eliminando parte de la molécula, al cortar con N (Nco1) y religar el fragmento que contenía la inserción.

DOBLE CADENA ADN

CORTAR Y MARCAR LOS EXTREMOS

CORTAR Y SEPARAR LAS PIEZAS

AISLAR LA CADENA MARCADA

DESECHAR

TRATAR CADA MUESTRA CON UN REACTIVO QUIMICO QUE ACTUA SELECTIVAMENTE SOBRE LA BASE INDICADA

G A T C

CONTROLAR LA REACCION PARA QUE SE GENEREN FRAGMENTOS A PARTIR DE CADA POSICION

C C G T A G T G CADENA ANALIZADA

SEPARACION DE FRAGMENTOS POR TAMAÑO EN ELECTROFORESIS Y VISUALIZACION POR AUTORRADIOGRAFIA

G A T C

MAYOR

CCGTAGT

CCGTAG

CCGTA

CCGT

CCG

CC

C

MENOR

SECUENCIA

G T G A T G C

G G+A T+C C

T G T G T G A A T G T T G T G A T G C C A T C A G A C A

7. SECUENCIACION POR EL METODO DE MAXAM Y GILBERT. Se corta el ADN mediante una enzima de restricción y se marcan los extremos 5′ fosfato con fósforo radiactivo (P32). El fragmento así marcado se corta de nuevo con una segunda enzima de restricción y se aísla el ADN que se va a secuenciar, que se hallará marcado radiactivamente sólo en uno de sus extremos. Este fragmento se somete, por separado, a la acción de cuatro reactivos químicos distintos, que actuarán selectivamente sobre las bases *G*, *A*, *T* y *C*, modificando una proporción variable de las mismas para dar lugar a un conjunto de moléculas de todos los tamaños posibles, cortadas específicamente en el nivel de las bases señaladas. Los fragmentos resultantes se separan en geles de acrilamida, y los que son radiactivos por conectar con el extremo 5′ quedan patentes en la autorradiografía. Las bandas en cuestión aparecen escalonadas y difieren una de la inmediata siguiente en un nucleótido. La lectura de esta escalera, desde el final del gel, donde se alojan los fragmentos más próximos al extremo marcado 5′, y en sentido ascendente, nos da la secuencia en la dirección 5′-3′. A la derecha se muestra la autorradiografía de un segmento de la secuencia del gen H1.

gunas –pensemos en la *H5*– difieren tanto que pueden considerarse incluso como no pertenecientes a la familia del gen H1. El gen H5 se caracteriza, además, por encontrarse aislado en el genoma, es decir, sin formar parte del conjunto de genes de las histonas. ¿Existe en el genoma de la trucha variantes del gen de la histona *H*1, que no formen parte del conjunto?

Para resolver esa cuestión, se digirió el ADN genómico con enzimas de restricción. Ello nos aclararía si era posible obtener algún fragmento que, presentando un gen H1, se distinguiera nítidamente de los fragmentos portadores del gen H1 en los clones analizados. Utilizando genomas procedentes de truchas distintas o de tejidos distintos, los resultados indicaron siempre que los fragmentos que hibridaban con la sonda H1 eran los esperados a tenor del mapa de restricción de los clones conocidos. Además, el número de copias H1 encontrado en el genoma de la trucha (unas 145) coincidía con el número de copias hallado para los otros genes de histonas. Los resultados daban pie a dos posibles interpretaciones: que los genes H1 variantes estuvieran

REGION NO CODIFICADORA 5′

–532	–522	–512	–502	–492	–482	–472
GAGCTCTCCT	TTAGAACACC	AAGGAGCACA	TCAGGGGACG	CCAAACCATT	TGATTCCCTT	GCCAGACATC
–462	–452	–442	–432	–422	–412	–402
TCGGCTCACT	CCACAATCAA	TGGTGCTCGC	AATCGGATGC	ACTTTTAGGC	CATTTAGGAG	ACAAATAGCA
–392	–382	–372	–362	–352	–342	–332
CAGGAAAAGC	AGTGCGCACC	GCTCCACCCG	ACAGTCGAAC	GGTGAGGTTT	TGAGCGAGTC	GCAGCAAAAT
–322	–312	–302	–292	–282	–272	–262
GCACGGGCTT	CTGCAGCCCA	CATGACTTTA	TTCTGAACGG	ACACAAGTCT	GCTCGCTGGG	CCGTTCGCTT
–252	–242	–232	–222	–212	–202	–192
TTGGGCCAAA	AACACGGCTC	CGTCGGTGAC	TTTTGGCCCG	ATATTGGCGA	CCAGAAAACA	CAAGTGAAAG
–182	–172	–162	–152	–142	–132	–122
AGCATTTGGC	CAGCCCGGAG	AAGCCGAGCT	GGGTGGCTTG	AGTCTACATG	GTTCTCATGT	CGCGTTTAAG
–112	–102	–92	–82	–72	–62	–52
GCCAGCCCCC	TGCACGGTGT	GGAGCTTCAA	TAGCGCAGAG	CAGCGTCTAC	AGCAAAGTAC	TCCTCCTCAC
–42	–32	–22	–12	–2		
AGACTACCGT	AGTGTTGTAA	GTGTGTGTGT	TTACCGGACC	GAACGACAGA	C	

REGION CODIFICADORA

				14					29					44					59
ATG	GCA	GAA	GTC	GCA	CCA	GCA	CCC	GCC	GCC	GCC	GCG	CCG	GCC	AAG	GCA	CCC	AAG	AAG	AAG
Met	Ala	Glu	Val	Ala	Pro	Ala	Pro	Ala	Ala	Ala	Ala	Pro	Ala	Lys	Ala	Pro	Lys	Lys	Lys
				74					89					104					119
GCA	GCA	GCC	AAG	CCC	AAG	AAA	GCG	GGA	CCC	AGC	GTA	GGC	GAG	CTC	ATC	GTC	AAG	GCG	GTG
Ala	Ala	Ala	Lys	Pro	Lys	Lys	Ala	Gly	Pro	Ser	Val	Gly	Glu	Leu	Ile	Val	Lys	Ala	Val
				134					149					164					179
TCC	GCC	TCC	AAG	GAG	AGG	AGC	GGC	GTG	TCC	CTG	GCC	GCG	CTC	AAG	AAG	TCT	CTG	GCG	GCA
Ser	Ala	Ser	Lys	Glu	Arg	Ser	Gly	Val	Ser	Leu	Ala	Ala	Leu	Lys	Lys	Ser	Leu	Ala	Ala
				194					209					224					239
GGC	GGC	TAC	GAC	GTG	GAG	AAG	AAC	AAC	TCC	CGT	GTC	AAG	ATC	GCC	GTC	AAG	AGC	CTC	GTC
Gly	Gly	Tyr	Asp	Val	Glu	Lys	Asn	Asn	Ser	Arg	Val	Lys	Ile	Ala	Val	Lys	Ser	Leu	Val
				254					269					284					299
ACC	AAG	GGC	ACC	CTG	GTC	CAG	ACC	AAG	GGC	ACC	GGT	GCT	TCC	GGC	TCC	TTC	AAG	CTC	AAC
Thr	Lys	Gly	Thr	Leu	Val	Gln	Thr	Lys	Gly	Thr	Gly	Ala	Ser	Gly	Ser	Phe	Lys	Leu	Asn
				314					329					344					359
AAG	AAG	GCC	GTC	GAG	GCA	AAG	AAG	CCC	GCC	AAG	AAA	GCC	GCA	GCC	CCC	AAA	GCT	AAG	AAG
Lys	Lys	Ala	Val	Glu	Ala	Lys	Lys	Pro	Ala	Lys	Lys	Ala	Ala	Ala	Pro	Lys	Ala	Lys	Lys
				374					389					404					419
GTG	GCC	GCC	AAG	AAG	CCC	GCC	GCC	GCC	AAG	AAG	CCC	AAG	AAG	GTA	GCA	GCC	AAG	AAG	GCC
Val	Ala	Ala	Lys	Lys	Pro	Ala	Ala	Ala	Lys	Lys	Pro	Lys	Lys	Val	Ala	Ala	Lys	Lys	Ala
				434					449					464					479
GTG	GCC	GCA	AAG	AAG	TCC	CCC	AAG	AAG	GCC	AAG	AAG	CCC	GCT	ACA	CCC	AAA	AAG	GCC	GCC
Val	Ala	Ala	Lys	Lys	Ser	Pro	Lys	Lys	Ala	Lys	Lys	Pro	Ala	Thr	Pro	Lys	Lys	Ala	Ala
				494					509					524					539
AAG	AGC	CCA	AAG	AAG	GTG	AAG	AAG	CCC	GCC	GCA	GCG	GCC	AAG	AAA	GCG	GCC	AAG	AGC	CCC
Lys	Ser	Pro	Lys	Lys	Val	Lys	Lys	Pro	Ala	Ala	Ala	Ala	Lys	Lys	Ala	Ala	Lys	Ser	Pro
				554					569					584					599
AAG	AAG	GCT	ACC	AAG	GCA	GCG	AAG	CCC	AAA	GCC	GCC	AAG	CCC	AAG	GCG	GCC	AAG	GCC	AAG
Lys	Lys	Ala	Thr	Lys	Ala	Ala	Lys	Pro	Lys	Ala	Ala	Lys	Pro	Lys	Ala	Ala	Lys	Ala	Lys
				614															
AAG	GCA	GCC	CCC	AAG	AAG	AAG	TAA												
Lys	Ala	Ala	Pro	Lys	Lys	Lys	Ter												

REGION NO CODIFICADORA 3′

633	643	653	663	673	683	693
ACCTATTACA	AACAGTGTTC	TTTCTACTCG	ACACATGTTG	TTACCACAAA	AGGCTCTTTT	AAGAGCCACC
703	713	723	733	743	753	763
CACCTCTTTC	CATAAAAGCG	CATGTCATTC	CATTCCACCT	ACCTACCCGT	GGTGCAAAAG	AAATGAAATG
773	783	793	803	813	823	833
AATGACTTTT	ACGCACCACA	TTTTCGAGTG	GCTAAATGGC	TTTACATTTG	TCACTCAAGA	GTGCAGCACC
843	853	863	873	883	893	903
CTCACCAGTC	AACATTGTTG	TGATGTGTTA	GAATTGGCAT	GTCACATTGA	TCCTGATAAT	AAGAAGCATA
913	923	933	943	953	963	973
CATACTATAG	TGGGTTGGAC	AGCAGCCATT	GGTATTATGA	GCCACTCTCG	AATTGATTGA	TACACGTTTC
983	993	1003	1013	1023	1033	1043
AGTGATTTGA	GTAGTCACTT	TGGCGCTCCC	GCCAACGTGA	AAAAGTCACA	AAAGTCGGAG	GGAAACAGAG
1053	1063	1073	1083	1093	1103	1113
TAGCCTAGCC	CTCGTCACTC	TGCTGCCTGC	CTGCCTGCGG	GTGGGTGGGG	GCGGGCTTAG	GGCTGACTGC
1123	1133	1143	1153	1163	1173	
CTGTCTGTCT	GTCCCCTCCC	TCACTCCAAT	GGATAGGCCA	CACCGGTCCG	GTGGCCAATC	GAT

en los clones caracterizados sin que las diferencias aparecieran en las cortas secuencias reconocidas por las enzimas de restricción o que las diferencias de secuencia en las variantes H1 bastaran para que no hibridaran con la sonda del gen H1 secuenciado.

Seyedin y Cole describieron, en 1981, variantes de la proteína *H*1 en la trucha, sirviéndose de la separación cromatográfica. En extractos de hígado aparecían seis picos cromatográficos, ocho en el riñón y uno solo en el tejido testicular.

En 1977, McLeod y colaboradores, trabajando en el mismo laboratorio de Gordon H. Dixon, habían obtenido la secuencia proteica de la histona *H*1 de testículo de trucha. Comparando la secuencia encontrada por McLeod con la deducida del gen secuenciado, se observan ciertas diferencias en las regiones menos conservadas de la molécula. En el extremo inicial: serina por alanina, alanina por serina en dos posiciones, alanina por isoleucina y glicina por valina; en la parte globular se registra un solo cambio, ácido glutámico por glutamina; en la cola, las diferencias consisten en reorganizaciones de fragmentos de secuencia idéntica y en la presencia de un péptido adicional de 12 aminoácidos en el gen secuenciado. Existe la posibilidad de que variantes de este tipo, con modificaciones en unos cuantos aminoácidos, se den y se organicen en el genoma, de forma idéntica a la de los clones caracterizados.

¿Qué sucede con el clon lambda TH3? Este difiere del resto de clones por haber perdido un sitio de restricción en la región codificadora del gen de la histona *H*1. Nos preguntamos si se trataba de una variante H1 y secuenciamos por entero la región del clon correspondiente a esta histona. Descubrimos que se trataba de un gen con una deleción, es decir, carente de parte de la secuencia, justamente la que corresponde a la nariz y a la parte globular. Sólo quedan 177 pares de bases que codifican la cola de la *H*1 y las secuencias reguladoras de los extremos 5′ y 3′. El hecho de que sea la cola de la proteína *H*1 la responsable de que esta histona entre en el núcleo y el que secuencias parecidas a esta cola estén implicadas en la introducción de otras proteínas en el núcleo plantean una cuestión del máximo interés: ¿desempeña la cola alguna función *in vivo*? No podemos contestar mientras no se detecte el gen, tal como se encuentra en el clon lambda TH3, en el genoma o en el ARNm.

Las investigaciones realizadas y las que estamos llevando actualmente a cabo en el Laboratorio de Genética Molecular de la Facultad de Medicina de la Universidad de Barcelona, se encaminan a completar la caracterización de los genes de la histona *H*1 con el objeto de poder abordar su expresión genética diferencial. Siendo, como se ha dicho anteriormente, la histona *H*1 la que controla la superestructura de la cromatina, de la mano de esa proteína puede recorrerse un doble camino: el de la expresión genética del gen a la histona, y la vía inversa, de la histona al gen. En este último caso se trata de descifrar el papel que esta proteína ejerce controlando la accesibilidad de los genes en la cromatina a la maquinaria molecular responsable de su expresión fenotípica.

Para estas investigaciones, la línea germinal espermatogénica estudiada en nuestro laboratorio constituye un modelo ideal [véase “Espermatogénesis”, por Cristóbal Mezquita, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1981]. A lo largo de la espermatogénesis ocurren cambios drásticos en la estructura y función del genoma que se acompañan de cambios cualitativos y cuantitativos en las histonas *H*1. Las implicaciones de los avances en el conocimiento de los mecanismos de expresión genética para descifrar los procesos que conducen a la diferenciación de las células normales o a su transformación cancerosa resultan evidentes. Pero, además, el modelo investigado permitirá, utilizando el genoma de la línea germinal como hilo de Ariadna, llegar hasta los mecanismos que programan el desarrollo embriológico y que se encuentran en la base de las futuras características fisiológicas o patológicas del individuo y la especie.

8. GEN DE LA HISTONA H1. La región codificadora se inicia con el triplete *ATG*; a éste le siguen los demás tripletes que se traducirán en la secuencia de la proteína *H*1. El final de la región codificadora se reconoce por el triplete *TAA*. Delante y detrás de dicha región aparecen las secuencias que pueden desempeñar una función reguladora; en la región 5′, la secuencia promotora *TTTAA*, las secuencias específicas de los genes H1, *AGAAAACACA* y la secuencia alternante *GTGTGTGTGT*. En la región 3′, la secuencia de 16 nucleótidos *GGCTCTTTTAAGAGCC*, con dos mitades complementarias de siete nucleótidos, marca el final de la molécula de ARNm. Las secuencias que siguen a esta región 3′ se cortarán después de la transcripción por un mecanismo en el que se hallan implicadas, probablemente, las secuencias *AAAAGCGC* y *TTCCA*. En azul se representan las secuencias que sólo existen en el gen o que son eliminadas del ARNm antes de la traducción.

Juegos de ordenador

A los oídos de algunos, los sonidos de la informática parecen música

A. K. Dewdney

En 1965 oí por primera vez el sonido de los cómputos. A un ordenador IBM 7090 del Centro de Cálculo de la Universidad de Illinois se le había acoplado un sencillo captador electromagnético conectado a un altavoz. Al ejecutar cierto programa, el contenido de un registro de la máquina cambiaba miles de veces por segundo. Las pautas y secuencias de diminutos "clics" así producidos semejaban un pasmoso torrente de sonidos casi extramundanos, donde alternaban zumbidos, chillidos, eruptos, rugidos y gemidos. De vez en cuando, un rechinar, como de muela de afilador, se remontaba de un tono grave a otro agudo. Tal sonido podría salir de un bucle doble del programa; quizás el bucle interno se ejecutara más rápidamente, generando un tono de altura cada vez mayor. En conjunto, recordaba la llamada de una ballena.

El experimento ha sugerido una pléyade de programas que exploran aspectos melódicos, armónicos y rítmicos. Los ordenadores domésticos no suelen venir equipados con captadores electromagnéticos acoplados a los registros acumuladores, pero la mayoría sí dispone de pequeños altavoces conectados a un rudimentario generador de tonos. Los lenguajes de programación más populares disponen, casi todos ellos, de instrucciones cuya ejecución genera gran variedad de sonidos. Se puede sacar partido de tan sencillo recurso para hacer audibles los programas y para confeccionar programas audibles. En el primer caso se añade una instrucción de generación sonora a un programa diseñado con propósito computacional. Comentaré brevemente ese aspecto más adelante. En el segundo se redacta un programa con la intención deliberada de obtener efectos melódicos, armónicos o rítmicos. Dos de los programas que aquí describiremos recuerdan a los del primer tipo; para ello se insertan unas pocas instrucciones de generación sonora en un programa que tiene, por lo demás, aspecto normal.

Resulta de lo más sencillo redactar un programa que genere melodías, consideradas mera sucesión de notas. En realidad, tal programa puede reducirse a un solo bucle. Un proceso de decisión inserto en el bucle determina la nota que debe tocarse y su duración. El proceso puede hacerse curar arbitrariamente complejo se desee. Tengo entendido que existen ya programas de ese tipo capaces de generar convincentemente melodías de estilos tradicionales. De ser así, me gustaría tener noticia de ellos. En el ínterin, mi plan de acción consistirá en dejar que sean los algoritmos que ya conocemos los que se encarguen de dar forma a la melodía.

Los más humildes candidatos al cargo de creador de melodías son simples algoritmos aritméticos. La salida numérica de tales algoritmos puede convertirse fácilmente en notas; la variedad de codificaciones posibles resulta enorme. La más sencilla de ellas se basa en la asignación por congruencia lineal, un proceso más breve que su nombre:

$$x \leftarrow (a \cdot x + b) \bmod m$$

Aquí, una vez especificados por adelantado los valores de los parámetros a, b y m, un valor inicialmente asignado a la variable x se convierte en una sucesión de valores, por iteración reiterada de la instrucción de asignación. La expresión "mod m" es abreviatura de "módulo m", que significa que el número que aparece entre paréntesis debe manejarse como las horas de un reloj de m horas. Así, por ejemplo, 10 módulo 8 es igual a 2. Por tanto, si m es 8 y a, b y el valor inicial de x son todos números enteros, se obtiene una sucesión de números comprendida entre 0 y 7.

La sucesión de números resultante se transforma, sin mayores dificultades, en una sucesión de notas merced a la sencilla tabla:

0	1	2	3	4	5	6	7
do	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*

En el programa que llamaré SOLFEO, los valores simbolizados por los nombres de las notas se remplazan por las frecuencias, expresadas en ciclos por segundo, de la escala de do mayor que comienza en el do^3:

0	1	2	3	4	5	6	7
262	294	330	349	392	440	494	523

Se resume el programa entero en la forma algorítmica habitual:

introducción de *a, b, x*
desde $i = 1$ hasta 100
  $x \leftarrow (a \cdot x + b)$ mod 8
  nota ← *notas*(x)
  tocar *nota*

En mi versión de SOLFEO, la instrucción que genera un tono de altura dada se sirve directamente de los números de la tabla *notas*. La mayoría de los lenguajes permiten igualmente controlar la duración del sonido. De momento bastará con dejar fija la duración del tono,

Nota	do	do$^{\sharp}$	re	re$^{\sharp}$	mi	fa	fa$^{\sharp}$	sol	sol$^{\sharp}$	la	la$^{\sharp}$	si	do
Frecuencia	261.6	277.2	293.7	311.1	329.6	349.2	370.0	392.0	415.3	440.0	466.2	493.9	523.3

Las frecuencias de las notas por encima o debajo de esta octava se obtienen multiplicando o dividiendo por 1,05946 y redondeando adecuadamente. La razón de esa progresión geométrica es la raíz doceava de 2.

1. Frecuencias de la escala cromática, desde el do^3 hasta el do^4

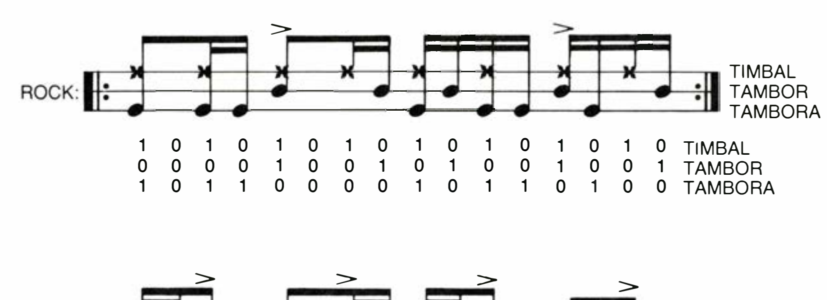
ajustándola, por ejemplo, a medio segundo.

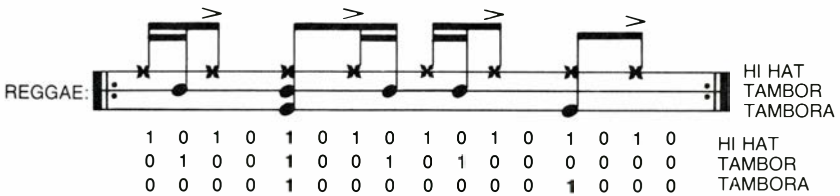
A quienes tengan "oído" aritmético les aguarda ya un mundo de maníacas melodías. En función de los números elegidos para los parámetros, tendremos ocasión de oír aburridas monodias en *staccato*, raras melodías repetitivas compuestas por unas pocas notas o músicas extrañamente salvajes, llenas de saltos y carreras. En esta última categoría he cometido más de una vez el pecado de no tomar nota de los parámetros responsables de alguna reiterativa e inquietante piececilla, perdida así para siempre por descuido mío. El algoritmo que he propuesto genera melodías de 100 notas de longitud. Puede que para explotar más posibilidades, los conquistadores de esos nuevos territorios musicales prefieran abreviar la longitud de las melodías.

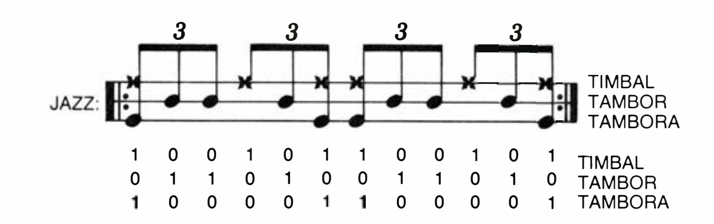
El programa SOLFEO puede y debe ampliarse. Elijamos para el módulo m un valor superior, lo bastante para abarcar dos o más octavas diatónicas. No existe restricción modal como tal; en lugar de escalas diatónicas podemos optar por escalas cromáticas, de 12 notas, intercalando 5 semitonos. Se puede optar incluso por la ultramoderna forma de música lineal-congruente, en la cual los números x generados por el algoritmo especifican frecuencias de modo más directo, por adición de una constante, 100 pongamos por caso. Si en un momento dado x vale 183, la nota que interpretará el programa tendrá frecuencia 283. Me pregunto qué otras posibilidades inventarán los lectores.

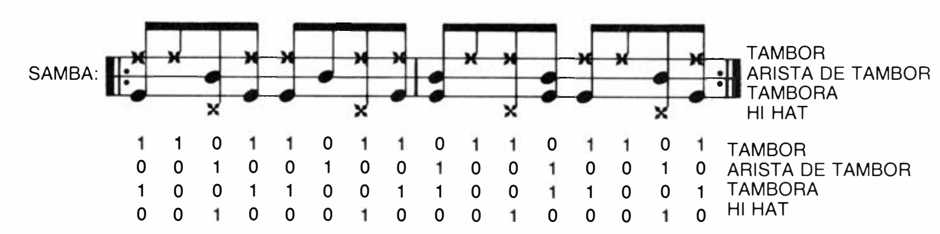
En el ínterin, he aquí una interesante cuestión con la que combatir el aburrimiento. Dados valores de a, b y m, ¿cuántas notas tocará el programa antes de que la melodía comience a repetirse?

En nuestros días, muchos ordenadores domésticos disponen de suficiente capacidad vocal para abordar la armonía. Los que estén equipados con dos o más altavoces podrán reproducir el repertorio completo generado por un programa que llamo CANON. Estoy seguro de que algunos entusiastas llevarán el proyecto mucho más lejos. No faltarán lectores que hayan adquirido un MIDI, acrónimo que denota el interfaz digital para instrumentos musicales, "*m*usical *i*nstrument *d*igital *i*nterface", una caja negra que convierte las señales generadas por el ordenador en mandatos para instrumentos electrónicos, como teclados o canales de sintetizadores.









2. Cuatro ritmos de muestra para ALRITMO

CANON genera armonías de dos partes, en las que intervienen dos líneas melódicas casi idénticas. Tonadas como "Row, Row, Row Your Boat" y "Frère Jacques" son ejemplos del tipo, si no de la especie. CANON genera cánones obedeciendo a la tradición académica conocida por imitación de primera especie, primer paso de todo estudio serio del contrapunto.

Tal armonización consta de dos líneas melódicas que satisfacen cuatro criterios. Primero, todas las notas tienen la misma duración. Segundo, las líneas melódicas comienzan una tras otra. Tercero, ambas líneas son idénticas, salvo en que una de ellas es trasposición ascendente de la otra cierto intervalo musical "canónico" (unísono, cuarta perfecta, quinta perfecta u octava). Se encontrarán todas las reglas de trasposición en cualquier texto de armonía musical. Por lo general, tales reglas incluyen los intervalos armónicos admitidos y establecen la forma de las líneas melódicas que intervienen [*véase la figura 3*]. Por mor de simplicidad se ha omitido esta última.

La figura 4 muestra un ejemplo de armonía escrita en imitación de primera especie. El ejemplo lo redactó una persona, no una máquina. Basta una ojeada para darse cuenta de que, llegado cierto punto, el compositor se ha cansado de las extenuantes exigencias que le imponen los cuatro criterios. De ordinario suele abandonarse primero la tercera regla; basta con que la segunda línea imite el espíritu de la primera.

Por el contrario, esas restricciones no agotan al programa de ordenador. CANON avanzará incansablemente hasta generar una pieza musical entera. Empero, la salida del programa suele ser aburrida. Para evitar ese inconveniente he generado multitud de cánones breves y he catalogado los más interesantes, algunos de los cuales podrán hilvanarse para formar, tras el correcto empalme, piezas más largas [*véase la figura 5*]. El experimento se realizó hace un decenio, con ayuda de Gregory Utas, alumno mío en la Universidad de Ontario Occidental.

En las piezas, CANON va abriéndose

NOTA SUPERIOR / NOTA INFERIOR

	do	do♯	re	re♯	mi	fa	fa♯	sol	sol♯	la	la♯	si	do
do		X	X			X	X				X	X	
do♯			X	X			X	X				X	X
re				X	X			X	X				X
re♯					X	X			X	X			
mi						X	X			X	X		
fa							X	X			X	X	
fa♯								X	X			X	X
sol									X	X			X
sol♯										X	X		
la											X	X	
la♯												X	X
si													X
do													

NOMBRE	NUMERO DE SEMITONOS
1	0
1+/2°	1
2	2
3−	3
3	4
P4	5
4+/5°	6
P5	7
6−	8
6	9
7−	10
7	11
8	12

Según la tabla *a*, dos notas simultáneas son consonantes si sus combinaciones no corresponden a una X. La tabla *b* da los nombres y tamaños (en semitonos) de los intervalos armónicos resultantes. En la imitación de primera especie se consideran armónicos los intervalos de unísono (1), tercera mayor y menor (3^- y 3), cuarta perfecta (P4), quinta perfecta (P5), sextas mayor y menor (6^- y 6) y octava (8). Los correspondientes números de pasos (medidos en semitonos) son 0, 3, 4, 5, 7, 8, 9 y 12.

3. Tabla de intervalos armónicos consonantes

paso por enumeración de todas las posibilidades. Supongamos, por ejemplo, que se le haya ordenado generar un canon miniatura, de seis notas de duración. Por razones que pronto resultarán obvias, la gama tonal abarcada por cada línea musical es pequeña; por ejemplo, de seis pasos cromáticos arriba o abajo a partir de la tónica, la primera nota de la pieza. Imagínese que el conjunto de 13 posibles notas se corresponde con los 13 dígitos del sistema de numeración de base 13. El dígito 0 representa el tono situado seis pasos por debajo de la nota tónica y, el "dígito", 13 el tono que se encuentra seis pasos por arriba. CANON procede del modo más sencillo, abriéndose paso por puro recuento a través de todos los números de 6 cifras que se puedan formar en base 13. Después de todo, cada uno representa el código de una melodía.

Cada vez que CANON genera una nueva línea melódica le saca una copia, la traspone una quinta hacia arriba y la traslada hacia delante un número especificado de notas, dos por ejemplo. Seguidamente compara los pares de notas que tal operación ha yuxtapuesto en el tiempo. Si ninguno de los pares resultantes contraviene las normas que rigen la armonía, se acepta la línea compuesta como canónica y se procede a imprimirla inmediatamente, para satisfacción del impaciente compositor, o bien se guarda en un archivo para imprimirla posteriormente.

En particular, antes de ejecutar el programa, CANON exige que el compositor especifique tres parámetros: *int*, el intervalo de imitación, *dil*, la dilación o retraso del instante de comienzo de la segunda línea melódica, y *num*, el número de notas que integra cada línea. Las notas de la línea que esté generándose se almacenan en la tabla llamada melodía o, más brevemente, *mel*. He aquí, a grandes rasgos, la estructura algorítmica de CANON:

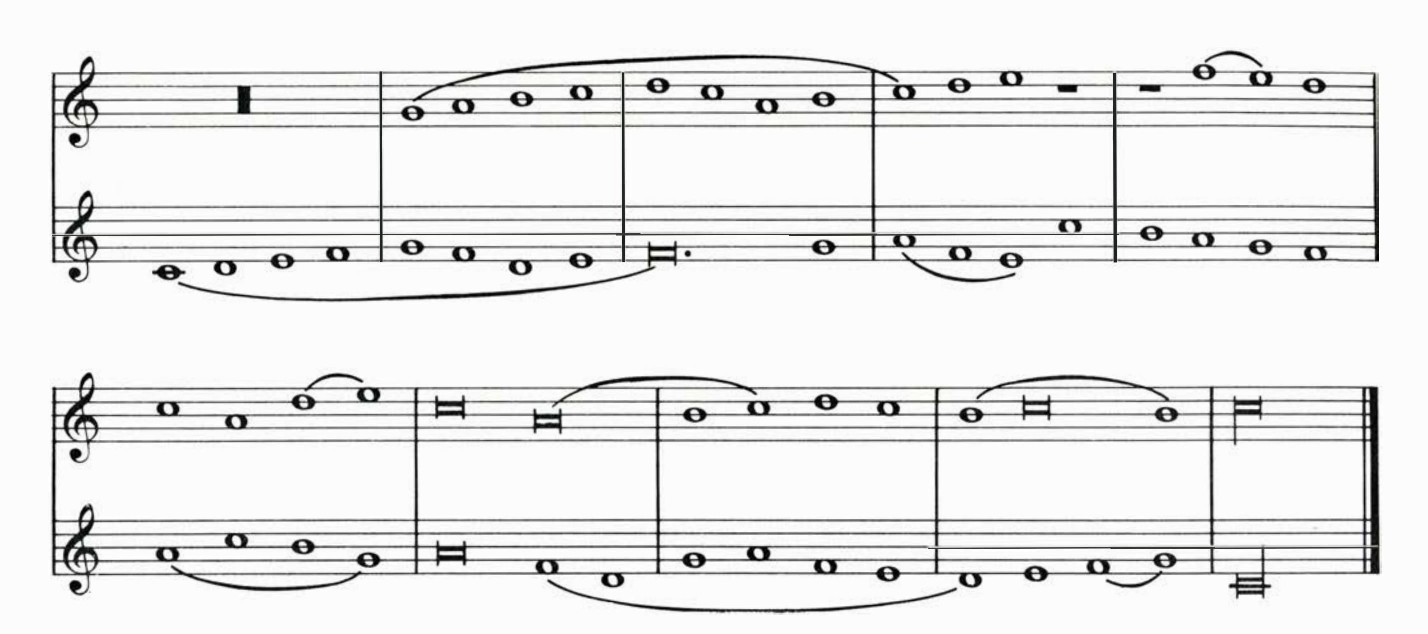
```
introducción de int, dil, num
mel(1) ← 7
desde i = 2 hasta num
  mel(i) ← 1
hallado ← falso
mientras hallado falso
  incrementar mel
  desde j = 1 hasta num − dil
    comparar mel(j) y
      mel(j + dil) + int
  si es armonioso, entonces
    hallado ← verdadero
dar salida a mel
opción de continuar
```

El algoritmo comienza asignando a *mel*(1), la primera nota del canon, el valor 7. Se trata de la tónica, y su valor no cambiará. Los restantes elementos de la tabla *mel* comienzan con el valor 0. Un bucle del tipo "mientras [condición]" va examinando el valor de una variable booleana, o variable lógica, llamada *hallado*, a la que inicialmente se le asigna el valor "falso". La variable *hallado* recibe el valor "verdadero" en cuanto las instrucciones que componen el cuerpo del bucle descubren una línea melódica que vale como canon. Primero se incrementa la tabla *mel*. Para ello puede inspeccionarse la tabla de derecha a izquierda. En el proceso de inspección, el procedimiento de enumeración busca en la matriz una entrada que sea menor que 13. Cuando da con ella, le suma 1 y anula todas las entradas situadas a su derecha (si las hay). Eso es exactamente lo que se hace al sumar, donde el 9 hace el papel que aquí le corresponde al 13. Por ejemplo, 3572 + 1 = 3573; 3579 + 1 = 3580 y 3599 + 1 = 3600.

La siguiente tarea que debe realizar el bucle es comparar cada nota *mel*(*j*) con la nota *mel*(*j* + *dil*) + *int*. Dicho de otro modo, el programa le suma *int* a la nota situada *dil* notas después de *mel*(*j*) y consulta la diferencia de los valores de las dos notas en la tabla de reglas correspondientes a la imitación de primera especie. Si la diferencia se considera armoniosa en todos los casos, desde 1 hasta *num* − *dil*, se le asigna a la variable booleana *hallado* el valor "verdadero". (Las notas situadas a partir de *num* − *dil* se tocan sin armonización que las acompañe. Así pues, no es preciso consultar en la tabla las correspondientes diferencias de notas.) En cuanto se descubre e imprime una línea melódica, el programa le pregunta al compositor si desea continuar. En caso afirmativo, se toma la rama de regreso a la instrucción *hallado* ← falso y se reanuda el recuento en el punto donde se dejó.

Por supuesto, pueden ejecutarse las líneas melódicas descubiertas por CANON mediante el pequeño altavoz del ordenador doméstico. No obstante, los lectores con inclinaciones musicales adquirirán sin duda el hábito de tararear la línea, o de transcribirla junto con su acompañante canónica a papel pautado. Puede después ensayarse la interpretación del canon junto con otro teclado, donde manifestará su armoniosa gloria.

El ritmo constituye una forma musical mucho más compleja de lo que algunos lectores pueden suponer. El ritmo de la música tradicional europea nunca ha sido excesivamente elaborado. Por el contrario, la moderna musica popular ha abrazado una extraordinaria variedad de formas rítmicas. En

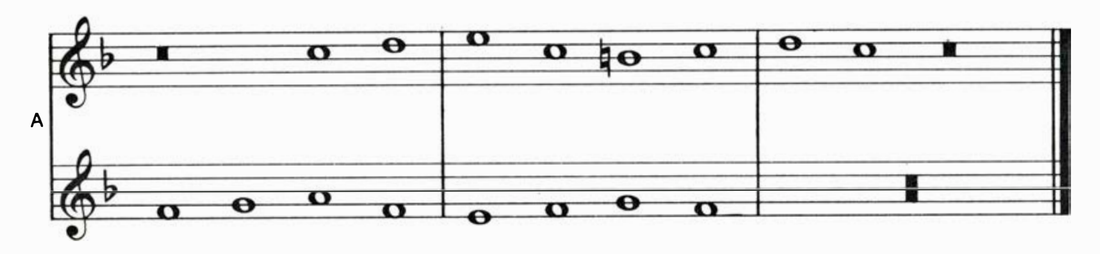


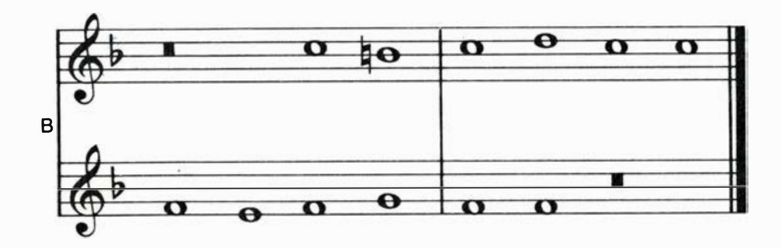
4. Ejemplo de imitación en dos partes, de primera especie, tomado de un manual

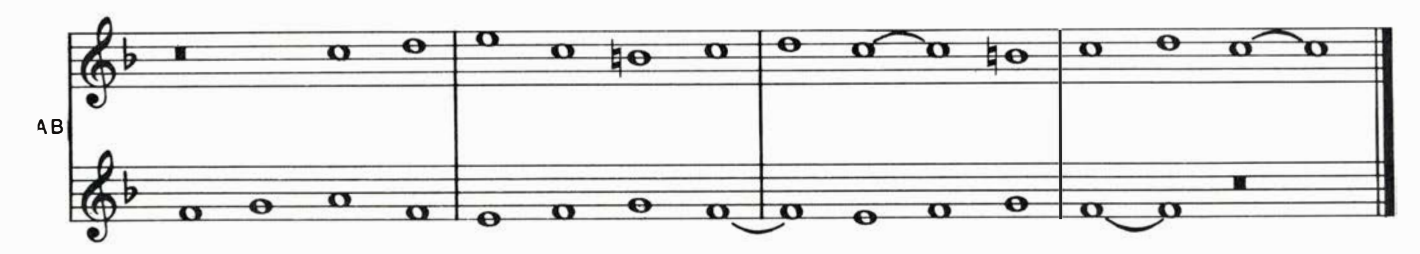
su mayoría encuentran sus orígenes directos o indirectos en la música africana o asiática, cuya influencia se aprecia en casi toda la música rock, el jazz y las músicas de inspiración caribeña y latinoamericana. Los occidentales vamos percatándonos cada vez más de la compleja aportación de las tablas (un par de tambores que se tocan con los dedos) a las formas musicales indias, como la raga.

El programa que llamo ALRITMO nos permite especificar ritmos sencillos mediante series de 0 y 1. Tales series se convierten en sonidos por el sencillo procedimiento de ir repasando la secuencia reiteradamente. En cada pasada, la presencia de un 1 desencadena un breve impulso tonal; los 0 no desencadenan nada.

En realidad, ALRITMO es lo bastante sencillo para describirlo sin mayores miramientos. Su estructura es muy similar a la de SOLFEO (el programa que toca música lineal-congruente). Una matriz sencilla llamada *impulso* contiene el ritmo en la forma especificada







5. Dos cánones generados por ordenador, empalmados para formar uno más largo

por el programador al principio de cada pasada del programa:

```
introducción de impulso, num, dur
desde i = 1 hasta 25
   desde j = 1 hasta num
   k ← 1
   mientras k ≤ dur
      k ← k + 1
   si impulso(j) = 1
      entonces sonido
```

Las variables denominadas *num* y *dur* especifican, respectivamente, el tamaño de la tabla y la separación de los sonidos. El bucle exterior determina que el intervalo rítmico fundamental contenido en *impulso* se toque 25 veces, cifra que podrán modificar fácilmente los lectores que, por haber atinado con ritmos de su gusto, quisieran oírlos más largamente. El bucle interior controla el índice de la tabla; el algoritmo irá examinando una por una, a su turno, las entradas que contiene, para decidir si ha de ejecutar o no un sonido. ¿Cuánto habrá que esperar entre dos acontecimientos sonoros? El intervalo está determinado por un bucle especial de dilación que se dedica a contar hasta la duración *dur* especificada. Entonces, si *impulso*(j) es 1, el programa ALRITMO ejecutará una nota, un zumbido o el sonido que tenga a mano. Si *dur* es bajo el ritmo será rápido mientras que, si es alto, el ritmo será lento.

Lo mismo que sus predecesores, también ALRITMO puede mejorarse. Podemos aspirar a algo comparable a un conjunto de percusión empleando diversos tonos (preferiblemente tonos graves, que representen diversas clases de tambores, campanas o timbales). Aunque los sonidos seguramente distarán de dar impresión realista, los ritmos sí parecerán auténticos. Cabe complicar la tabla *impulso* utilizando enteros, como 0, 1, 2 y 3, para representar silencio, un timbal agudo, otro grave y ambos a la vez. En cada caso será preciso decodificar la entrada de *impulso* que esté examinando el bucle interior mediante un grupo de sentencias que controlen la ejecución de ningún sonido, un sonido o ambos sonidos. En este último caso, para remedar la simultaneidad se hacen sonar consecutivamente dos notas. Si se viera que al tocar las notas consecutivamente se rompe la sincronización de la pieza, convendrá llevar el bucle de pausa al interior de los enunciados condicionales, de forma que exista una copia para cada una de las cuatro posibilidades. En los casos de silencio y de dos sonidos, el límite *dur* tiene que remplazarse por dos nuevos límites, uno más breve y otro más largo que *dur*. En ambos casos, la diferencia será el tiempo asignado a una nota.

Una versión de ALRITMO más refinada probablemente fuera capaz de tocar algunos de los interesantes ritmos que recoge la figura 2. Las diversas partituras allí mostradas se han interpretado como secuencias de acontecimientos discretos ensartadas a lo largo de una base de tiempos común. Las notas pueden traducirse fácilmente en valores de la tabla *impulso* mediante una codificación que el aspirante a compositor habrá de preparar por su cuenta.

Por otra parte, y además de las correrías que acabamos de hacer por los dominios de la melodía, la armonía y el ritmo, sigo fascinado ante la idea de dotar a todo programa de ordenador de dos papeles. En uno de ellos, el ordenador computa lo que haya de computar. En el otro, al programa se le provee de unos cuantos tonos inmediatos a sus bucles interiores, bucles exteriores y sus enunciados condicionales (si..., entonces...). El programa ejecutaría una tonada distinta en cada problema que se le presentase. Quienes se habitúen a escuchar regularmente su programa favorito (ya sea recreativo o comercial) acabarán dominándolo sin más que atender a sus ejecuciones. No me cabe duda de que fácilmente podrán cazarse de oído algunos de los errores que presenten las nuevas versiones del soporte lógico. Se invita a dar el soplo a los lectores que tengan algo que contar sobre el tema que nos ocupa.

En el tiempo transcurrido desde la reseña del primer campeonato de Guerra Nuclear (marzo de 1987), el número de afiliados a la International Core Wars Society se ha cuadruplicado, me dice su director, Mark Clarkson, quien sigue dando la bienvenida a las expresiones de interés de quienes sientan curiosidad por el juego. Su dirección es 8619 Wassall Street, Wichita, Kansas, 67210 Estados Unidos. También William R. Buckley, editor de *The Core War Newsletter*, ha observado un salto concordante en el número de suscripciones. Buckley explica que su publicación se propone servir de órgano principal de comunicación entre los miembros de la sociedad conforme vayan mejorando las normas, se vayan desarrollando nuevas técnicas de combate y se eleven los niveles de juego. Quien esté interesado en suscribirse al boletín puede hacerlo escribiendo a Buckley al 5712 Kern Drive, Huntington Beach, California, 92649.

Taller y laboratorio

Cómo construir un barómetro con agua en vez de mercurio

Jearl Walker

Lo que podría llamarse el primer barómetro de la historia figuraba en un curioso experimento que, en 1641, realizó Gasparo Berti, un científico italiano. Consistía el experimento en cerrar el extremo inferior de un tubo largo con una llave de paso y sumergirlo verticalmente en una tina de agua. El tubo se llenaba entonces de agua por el extremo superior, se cerraba éste herméticamente y se abría la llave de paso. Sólo una pequeña cantidad de agua fluía al exterior del tubo.

Sostenía Berti que el leve descenso de la columna de agua dejaba un vacío encima de la misma. La posibilidad de que en la naturaleza pudiera existir el vacío la habían ya propuesto otros investigadores, pero se trataba de una idea que no gozaba de aceptación general. Sustentaba asimismo Berti que el agua permanecía dentro del tubo porque la presión atmosférica actuante sobre la superficie del agua recogida en la tina y expuesta al aire equilibraba la presión que ejercía el agua encerrada en el tubo.

El tubo del experimento de Berti tenía la altura de un edificio de varios pisos; demasiado grande, pues, para que pudiera servir de barómetro. Poco años después, su compatriota Evangelista Torricelli propuso sustituir el agua por mercurio, el cual, al ser 13,6 veces más denso, permitiría reducir la altura del instrumento. Tal aparato lo construyó Vincenzo Viviani, colaborador de Torricelli. Tomó un tubo de vidrio, de más de 75 centímetros de largo, lo cerró por un extremo y lo llenó de mercurio. Luego, tapando con un dedo el extremo abierto, le dio la vuelta y lo introdujo dentro del mercurio contenido en un recipiente abierto. Al retirar el dedo, salió mercurio del tubo hasta que el peso del que quedó dentro se igualó a la acción ejercida por la presión atmosférica. Este instrumento fue el primer barómetro auténtico. Observando la altura de la columna de mercurio, se podía medir la presión atmosférica. Cuando ésta era alta, empujaba el mercurio hacia el interior del tubo y la altura de la columna crecía. Cuando bajaba, permitía que saliera mercurio del tubo y la altura de la columna disminuía.

Dada la gran densidad del mercurio, las variaciones de la altura de la columna suelen ser pequeñas y, a veces, deben consignarse en longitudes inferiores a un milímetro. Entonces, ¿por qué no quedarnos, pues, con el agua como fluido operante? Pese a que el barómetro sería muy alto, las variaciones de la presión atmosférica se reflejarían en unos cambios de altura de columna 13,6 veces mayores que en un barómetro de mercurio. Por desgracia, el barómetro de agua deja bastante que desear en lo que respecta la noción de barómetro.

El gran inconveniente radica en el hecho de que el espacio que queda encima de la columna de agua no es el vacío completo conjeturado por Berti. Acontece que parte del agua se vaporiza y llena ese espacio. Además, con los cambios de temperatura, cambia también la cantidad de vapor. Por ello, la presión que el vapor ejerce sobre la columna varía también. Por ejemplo, en tiempo cálido la presión de vapor es mayor y reduce la altura de la columna. En consecuencia, tal aparato no resulta preciso como barómetro.

Sam Epstein, de Los Angeles, ha dado con un procedimiento para sortear la dificultad. Su barómetro contiene un anticongelante común (etilenglicol) disuelto en agua. Le sirve para reducir la evaporación en el extremo superior de la columna. La dependencia residual del aparato con la temperatura se registra en una tabla que confecciona al calibrar el instrumento.

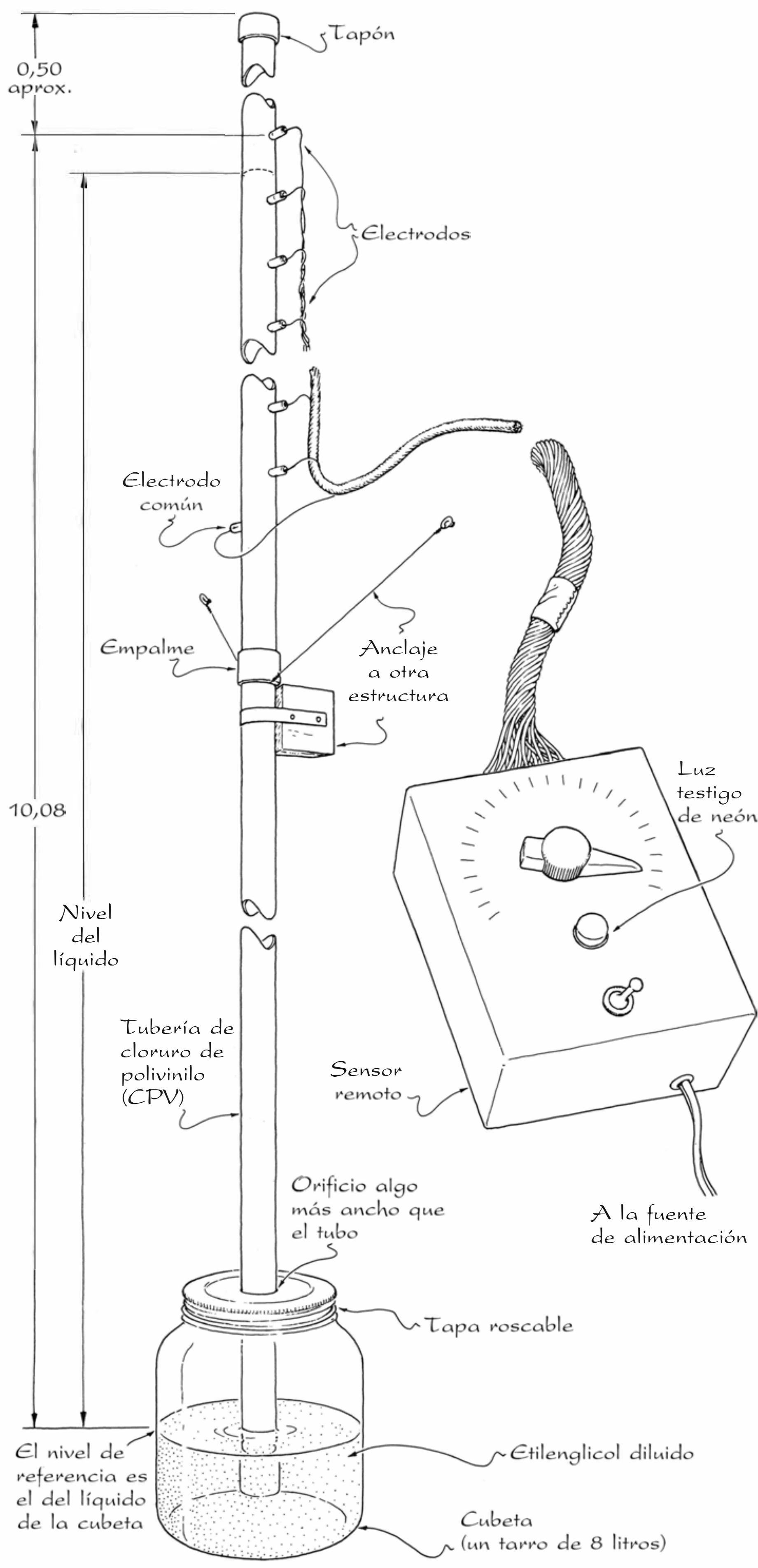
Epstein ha construido dos barómetros de esta clase: un barómetro de cubeta y otro de sifón, como él los llama. El barómetro de cubeta recuerda, en su hechura, al de Berti. Para adecuarse a la baja densidad de la mezcla anticongelante (1,07 veces la del agua), el aparato mide más de diez metros de altura. Con un sensor remoto que permite leer el nivel del líquido desde la base, evita tener que subir varios tramos de escalera cada vez que hay que tomar una lectura.

Quien desee construir un artefacto parecido, debe primero encontrar un lugar apto para instalarlo. Así, hay que sujetarlo a un muro mediante soportes, pero sin exponerlo directamente al Sol para evitar los calentamientos. Además, aunque el punto de solidificación de la mezcla anticongelante sea bajo (unos −36 °C), no se colocará donde pueda congelarse durante el invierno.

El barómetro consta de seis tramos de tubo de cloruro de polivinilo (CPV), de aproximadamente 1,80 m de longitud cada uno y 25 mm de diámetro interior. Si alguien quiere prescindir del sensor remoto, deberá hacer el último tramo de plástico transparente. Los tramos se unen con bridas de empalme y las uniones se hermetizan con cemento y tapaporos. Asegurémonos de que los cierres sean estancos; una vez que el cemento haya fraguado, los tramos sólo podrán separarse aserrándolos. Para preparar el fluido operante, se mezclan quince litros de un anticongelante de buena calidad con un volumen igual de agua destilada.

Los elementos sensores son 24 electrodos de platino repartidos a lo largo del último tramo. Cada uno de ellos se numera de acuerdo con su altura. Otro electrodo, montado en el costado opuesto del tubo, sirve de electrodo común. Así, cuando entre éste y un electrodo numerado se aplica una tensión eléctrica, una pequeña corriente atraviesa la solución anticongelante. Los electrodos numerados están conectados a un conmutador rotatorio, instalado en la base del barómetro. Cada vez que se pulsa el conmutador, entra en circuito un electrodo diferente. Entonces, al girar el conmutador hasta encontrar el último electrodo que conduce electricidad, se puede determinar la altura aproximada del líquido.

Los electrodos son de alambre de



1. Barómetro de agua de Sam Epstein

longitud de unos veintidós centímetros y de la galga del n.º 24, en cualquier tienda de material de laboratorio. Deben conseguirse también 25 tubitos de vidrio de quince centímetros de longitud y cinco milímetros de diámetro interno. El alambre se corta en trozos de nueve milímetros, cada uno de los cuales se dobla formando una Z que tenga los trazos horizontales de cuatro milímetros de largo. El extremo de cada tubito de vidrio se calienta en la llama de gas y aire comprimido de un mechero Meker, colocándolo encima mismo de la punta de la zona azul de la llama, mientras se le da vueltas lentamente para que el calentamiento resulte uniforme. El extremo del tubo no tardará en ablandarse y cerrarse. Cuando la abertura sea apenas un poco más ancha que los brazos del alambre, se inserta uno de los trozos de éste en el tubito y se continúa calentando el vidrio para que se cierre en torno a la parte central de la Z.

Cuando el tubito se cierre en torno al alambre, cae gradualmente la alimentación de aire al mechero mientras se hace girar el tubito en la llama. Pasado otro minuto, se retira y se deja enfriar. Téngase cuidado en no sobrecalentar el alambre, pues éste puede fundirse y estropear todo el trabajo. Una vez frío, se corta el extremo del tubito correspondiente al alambre hasta una longitud de 25 milímetros. El borde áspero del corte se pulimenta luego en la llama.

Cada electrodo se conecta al resto del circuito sensor mediante un hilo conductor de filamentos con aislamiento. Hay que tener a mano un trozo de unos 15 centímetros de conductor ya dispuesto con un extremo pelado. Sobre el electrodo se depositan unos doce milímetros, o un poco más, de suelda de ánima de colofonia 50/50. Seguidamente se mantiene en una llama de gas hasta que la suelda se funde. Entonces, se retira rápidamente del calor y el extremo pelado del conductor se introduce en la suelda fundida. Cuando el conjunto se haya enfriado se comprobará que el conductor esté firmemente incrustado; si no lo está, se repetirá la operación. Cuando el conductor se encuentre correctamente engastado, se cierra con pegamento de CPV el extremo del tubo por el que sale el platino.

Los electrodos se preparan de la manera descrita y, para instalarlos, se taladran unos orificios en el último tramo de la columna tubular de CPV. Cada uno de ellos debe medir exactamente lo preciso para acomodar un electrodo.

Sus centros deben espaciarse a intervalos de 5,6 centímetros a partir de 30 centímetros por debajo del borde superior de la columna. Luego los electrodos se sellan con pegamento de CPV. Cuando posteriormente se ensamble el barómetro, el electrodo más alto deberá situarse a una altura de 10,08 metros sobre el nivel del líquido de la cubeta.

Desde los cabos del hilo de conexión de cada electrodo se tiende hilo adicional en cantidad suficiente para llegar a la base del barómetro. Esos hilos se conectan cada uno a una resistencia conectada, a su vez, a una de las 24 posiciones del conmutador rotatorio. Las resistencias de los seis electrodos más bajos deben tener un valor nominal de 90 kilohm. Los electrodos más altos, más alejados del electrodo común, necesitan resistencias menores. Los electrodos se asocian en cuatro grupos de seis, disminuyendo en 20 kilohm la resistencia de cada grupo sucesivamente más alto. La potencia nominal de las resistencias debe ser de 0,5 watt.

El contacto giratorio del conmutador se conecta a un conmutador de palanca bipolar de una dirección. Desde éste se tiende un conductor hasta el electrodo común. En este trayecto se instala una lámpara de neón sin resistencia interna, con la misión de señalar cuándo pasa corriente por la solución anticongelante. El conmutador de palanca se conecta a un transformador de aislamiento enchufado a una toma de corriente de pared. Cuando se desee registrar una medición se conecta el conmutador (que debe estar abierto el resto del tiempo). Se elige entonces una posición del conmutador rotatorio y, si la lámpara de neón se enciende, el conmutador se gira a la izquierda hasta apagarlo. Si la lámpara no se enciende, el conmutador se gira a la derecha hasta que lo haga. La última posición del conmutador indica la altura del líquido dentro de la columna con una precisión de cinco centímetros.

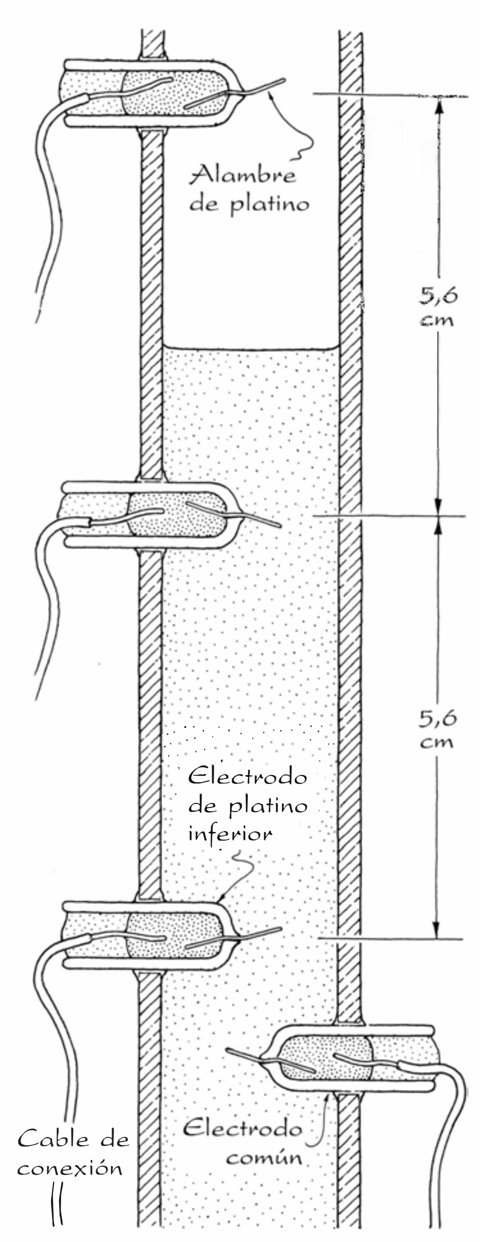
El resto de la estructura no depende del sensor remoto. La tubería de CPV se monta adosada a un muro y su extremo inferior se cierra con un tapón de corcho sujeto con cinta adhesiva o con una cápsula roscada. La cubeta es un tarro de boca ancha, de una capacidad de unos siete u ocho litros, con la tapa de rosca. En ésta se taladra un orificio un poco mayor que la tubería. El tarro se llena hasta la mitad de mezcla anticongelante. Luego, la tapa del tarro se desliza por el extremo inferior de la tubería, por lo que alguien debe ayudar a mantenerla bien erecta.

Se alza el soporte del tarro hasta que el extremo de la tubería penetre en la mezcla anticongelante. Se introduce, a continuación, un embudo por la boca superior de la tubería; lentamente, se vierte la mezcla anticongelante, tratando de que no se formen burbujas de aire. Ya llena la tubería, se esperan unos 30 minutos para que se disipen las burbujas que se hayan formado. Luego, se tapa y hermetiza la boca superior de la columna. El extremo inferior de ésta se destapona y la tapa del tarro se rosca en su sitio. Hay que esperar entonces un día para que los vapores del etilenglicol y el agua saturen el espacio que queda sobre la columna de líquido.

Si no se construye el sensor remoto, se alineará una escala con el extremo superior de la columna líquida para leer en ella la presión atmosférica. La altura de la columna líquida se mide desde el nivel de líquido en la cubeta. La escala debe extenderse desde una altura de 8,8 metros hasta los 10,08 metros, la misma longitud a lo largo de la cual se reparten los electrodos del sensor. Si la cubeta es lo bastante ancha, el nivel del líquido que contiene apenas varía con los cambios de presión atmosférica y, por ello, la escala puede fijarse al barómetro.

La escala puede marcarse de modo que la presión se lea, como es habitual, en altura de columna de mercurio. Como éste pesa 12,8 veces más que la mezcla de etilenglicol, la longitud total de la escala, 1,28 metros, representará una variación de presión de 0,1 metros, 100 milímetros, de columna de mercurio. Entonces, sabiendo esto, la escala puede dividirse, por ejemplo, en intervalos de 20 milímetros, cada uno de los cuales indicará una variación de $20 \times 100/1280 = 1{,}56$ milímetros de mercurio en la presión atmosférica. (La escala dividida de este modo contendrá 64 intervalos de 2 centímetros.) En consecuencia, si la columna de mezcla anticongelante sube 40 milímetros, en un barómetro de mercurio la columna subiría 3 milímetros (teóricamente, para ser exactos, 3,12 milímetros). Un razonamiento análogo nos permitiría graduar la escala en cualquier otra unidad de presión que nos convenga.

Si nuestro barómetro ha de estar expuesto a unas temperaturas que varíen entre márgenes muy amplios, será necesario registrar la altura del líquido a lo largo de toda la amplitud de la variación. Esas lecturas hay que compararlas con las presiones atmosféricas leídas en otro instrumento, tal como un barómetro de mercurio, al que no

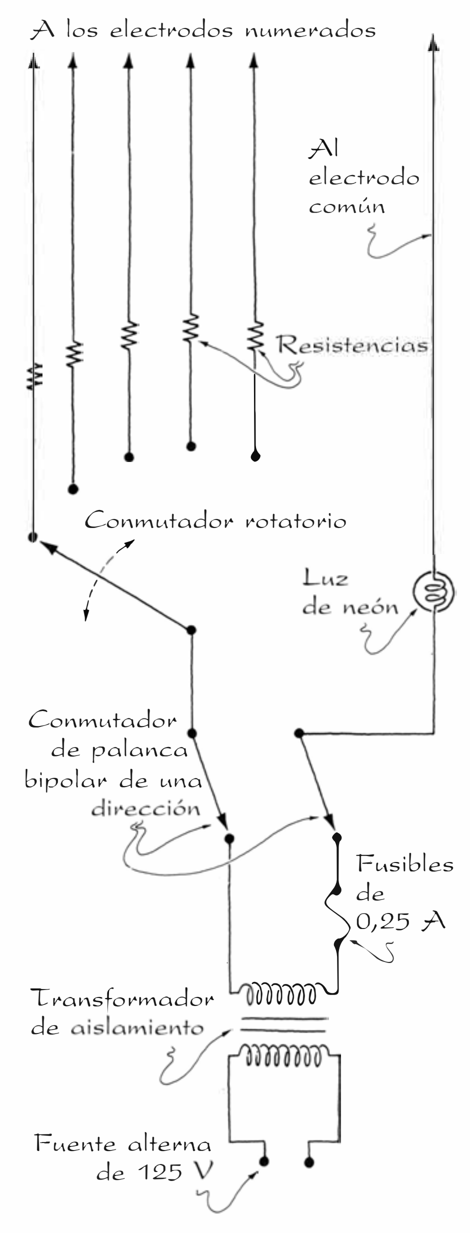


2. Colocación de los electrodos

afecte apreciablemente la temperatura. Lo que ocurre es que, a temperaturas muy bajas, la presión del vapor encerrado encima del líquido apenas altera la altura de la columna; ahora bien, a temperaturas más altas, la presión de vapor determina que la altura disminuya.

Una vez confeccionada una tabla de corrección por temperatura, ya no hará falta el segundo barómetro. Cuando se tome una lectura en el barómetro de anticongelante, se observará la temperatura en un termómetro situado junto a la base. Se empleará entonces la tabla para establecer la corrección a añadir a la lectura y así obtener la presión atmosférica verdadera.

El segundo instrumento de Epstein, el barómetro de sifón, se lee en la base, sin sensor remoto, y carece de cubeta.



3. Circuito eléctrico del sensor remoto

Tiene la forma de una U, con un brazo más corto que el otro. El más corto se hace de tubo de plástico transparente: mide 1,8 metros de longitud, con un diámetro interno de 25 milímetros. El brazo largo se compone de siete tramos de tubería de CPV. Los brazos se conectan mediante dos codos y un trozo corto de tubo de CPV. Una vez unidos con cemento tubos y codos, el conjunto se instala contra una pared, se introduce un embudo por el brazo corto y se vierte en el interior mezcla anticongelante en cantidad suficiente para llenar los dos brazos hasta una altura de un metro y medio.

Un pequeño cálculo nos permitirá averiguar qué cantidad adicional de líquido se necesita para equilibrar la presión atmosférica normal en la altitud a la que nos hallemos. A nivel del mar, la presión atmosférica equilibra el peso de una columna de mercurio de 760 milímetros. Para hallar la altura equivalente de anticongelante, multiplicaremos esa altura de mercurio por el cociente entre la densidad del mercurio y la del anticongelante, o sea, por 12,8. El resultado es de 9730 milímetros, en números redondos.

Por encima del nivel del mar se necesita menos líquido; por debajo, se necesita más. Así pues, debemos conocer nuestra altitud sobre el nivel del mar. Según los patrones vigentes en meteorología y aerodinámica, se admite que la presión atmosférica a 1000 metros de altitud es de 674 milímetros de mercurio. Esto hace que, por cada 100 metros, la columna descienda 8,6 milímetros por término medio. Este descenso reducido a altura de anticongelante será de $8,6 \times 12,8 = 110$ milímetros. O sea, por cada 100 metros de altitud sobre el nivel del mar, hay que restar 110 milímetros a la altura de referencia de 9730 milímetros. Y al revés, por cada 100 metros por debajo del nivel del mar, añadiremos 110 milímetros a la señal de referencia. Tras determinar de este modo la altura de referencia conforme con nuestra altitud, puede calcularse el volumen de líquido necesario para llenar los tubos de CPV hasta el nivel correspondiente.

Para añadir el líquido al barómetro se comienza por el brazo corto. El nivel de líquido sube hasta el borde del tubo, que se cierra con un tapón de corcho. En éste se practica un orificio en el que se acopla una llave de paso de vidrio, de unos dos o tres milímetros de calibre. Se cierra la llave de paso, se introduce el tapón en su lugar, se sella éste con cinta aislante y se añade el resto del líquido al brazo largo del instrumento.

Se esperan entonces 30 minutos para que las burbujas de aire escapen del líquido; se conecta, a la boca de la llave de paso, una bomba de aire de bicicleta. A la vez que se abre la llave, se bombea aire hacia el interior del barómetro, elevando el nivel del líquido contenido en el brazo largo. Se cierra inmediatamente la llave de paso. La boca del brazo largo se hermetiza con una cápsula sujeta con cemento. Cuando éste haya fraguado, se abre poco a poco la llave de paso. Se espera un día para que los vapores saturen el espacio libre creado encima de la columna larga de líquido. Luego, la llave de paso y el tapón de caucho se remplazan por otro tapón en el que se haya insertado un tubo de vidrio de 5 centímetros de longitud y un diámetro interno de un milímetro. Sujetaremos el tapón con cinta y lo taparemos con una cápsula lo bastante holgada para que pase el aire.

La escala de lectura de la presión atmosférica se instala junto al brazo corto. Su graduación debe correr en sentido contrario a la de la escala del barómetro de cubeta; y ello por la sencilla razón de que los aumentos de presión impulsan hacia abajo el líquido contenido en el brazo corto. Como los cambios de presión se dividen por igual entre los dos brazos del barómetro, el intervalo entre las marcas de la escala equivaldrá a la mitad que en la escala del barómetro de cubeta. O sea, ahora cada variación de altura de 20 milímetros representará una variación de presión de 3,12 milímetros de mercurio.

Para calibrar sus instrumentos, Epstein se valió de un barómetro de mercurio que él mismo construyó. Epstein, que es químico, conoce perfectamente las precauciones a tomar en la manipulación del mercurio. Quien decida construirse un barómetro de mercurio, deberá aconsejarse de alguien igualmente familiarizado con ese elemento. El trabajo debe realizarse en una zona muy ventilada; téngase presente que el mercurio no debe tocarse ni debe llegar a nuestra boca.

La capacidad del barómetro de Epstein es de cerca de un kilo de mercurio, que puede adquirirse en una tienda de artículos dentales. De soporte de respaldo del barómetro le sirve una tabla de madera de 12 milímetros de grosor que se cuelga de una pared mediante dos clavos murales, capaz cada uno de aguantar 25 kilos. El barómetro debe instalarse exactamente vertical. La cubeta, un tarro de tapa metálica roscable, descansa en un receptáculo que a su vez yace sobre una repisa de madera unida al respaldo. Esta repisa se taladra de modo que pueda traspasarse a presión con un redondo de acero de 25 milímetros de diámetro. El redondo se taladra y rosca para que acepte un tornillo de acero de $9,5 \times 400$ milímetros, que debe engrasarse antes de colocar. El extremo del tornillo debe ajustarse firmemente en un orificio roscado practicado en el fondo del receptáculo.

En la tapa de la cubeta se abren dos orificios. Uno de ellos, exactamente centrado, será un poco mayor que el tubo de mercurio que pasará por él. El otro orificio será un poco mayor que una aguja de hacer punto de plástico, que penetrará en la cubeta. La tapa lleva pegado por dentro un forro de caucho provisto de unos orificios similares, que se ciñen apretadamente en torno al tubo y la aguja. Estos orificios

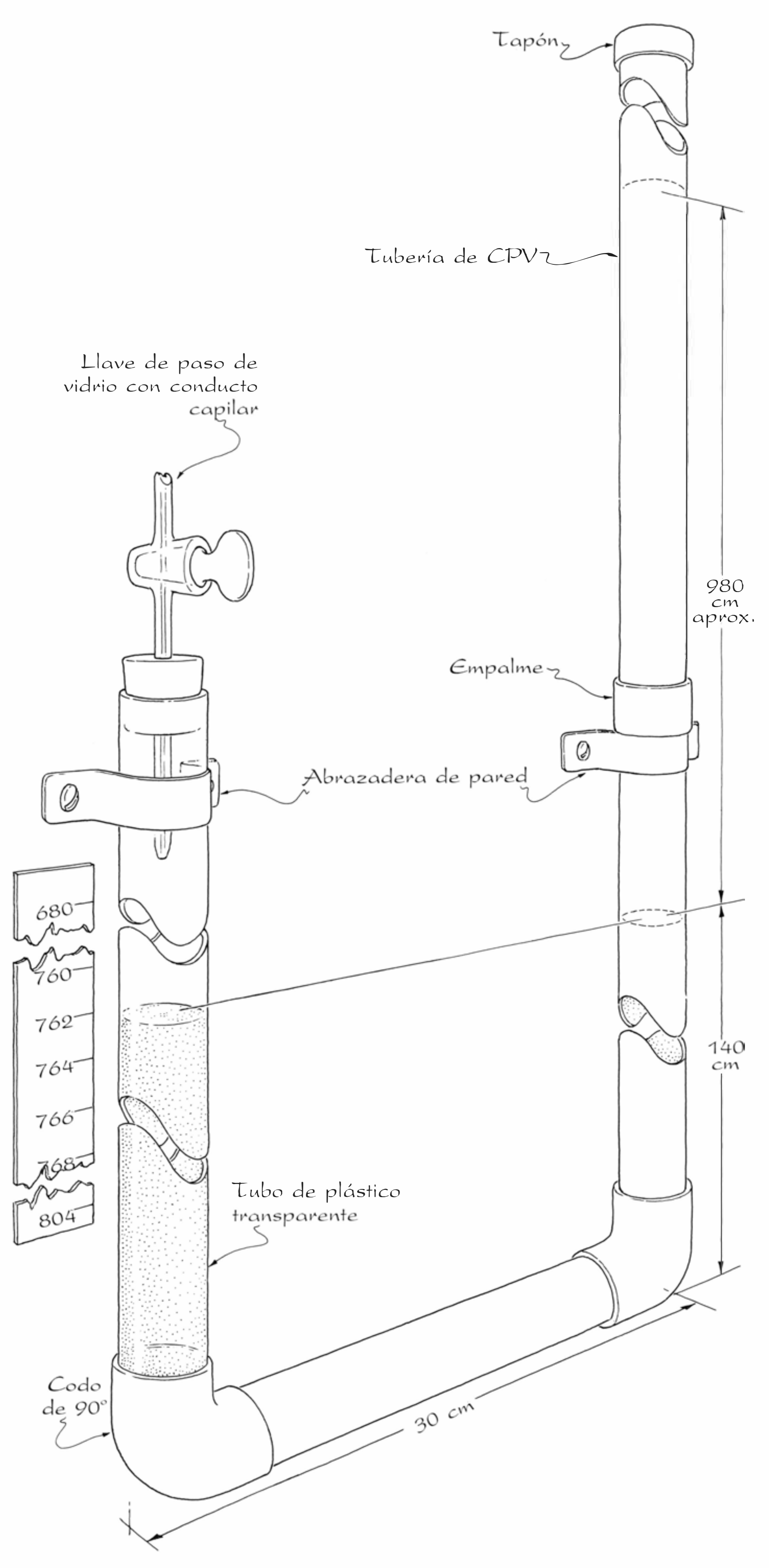
se abren con un perforacorchos de laboratorio. En el orificio del forro correspondiente al tubo del mercurio se hace una diminuta entalladura en V, tan pequeña que apenas debe verse. Debe dejar pasar el aire para que se igualen las presiones de éste dentro y fuera de la cubeta. Su tamaño, bastante reducido, permitirá que el paso de vapor de mercurio se mantenga en un nivel despreciable.

Del respaldo sale un soporte para la aguja. La punta de ésta indica la altura de un nivel de referencia grabado en el respaldo. Cada vez que se lee la presión atmosférica, la altura de la cubeta se ajusta hasta que el nivel del mercurio que contiene coincida con la punta de la aguja.

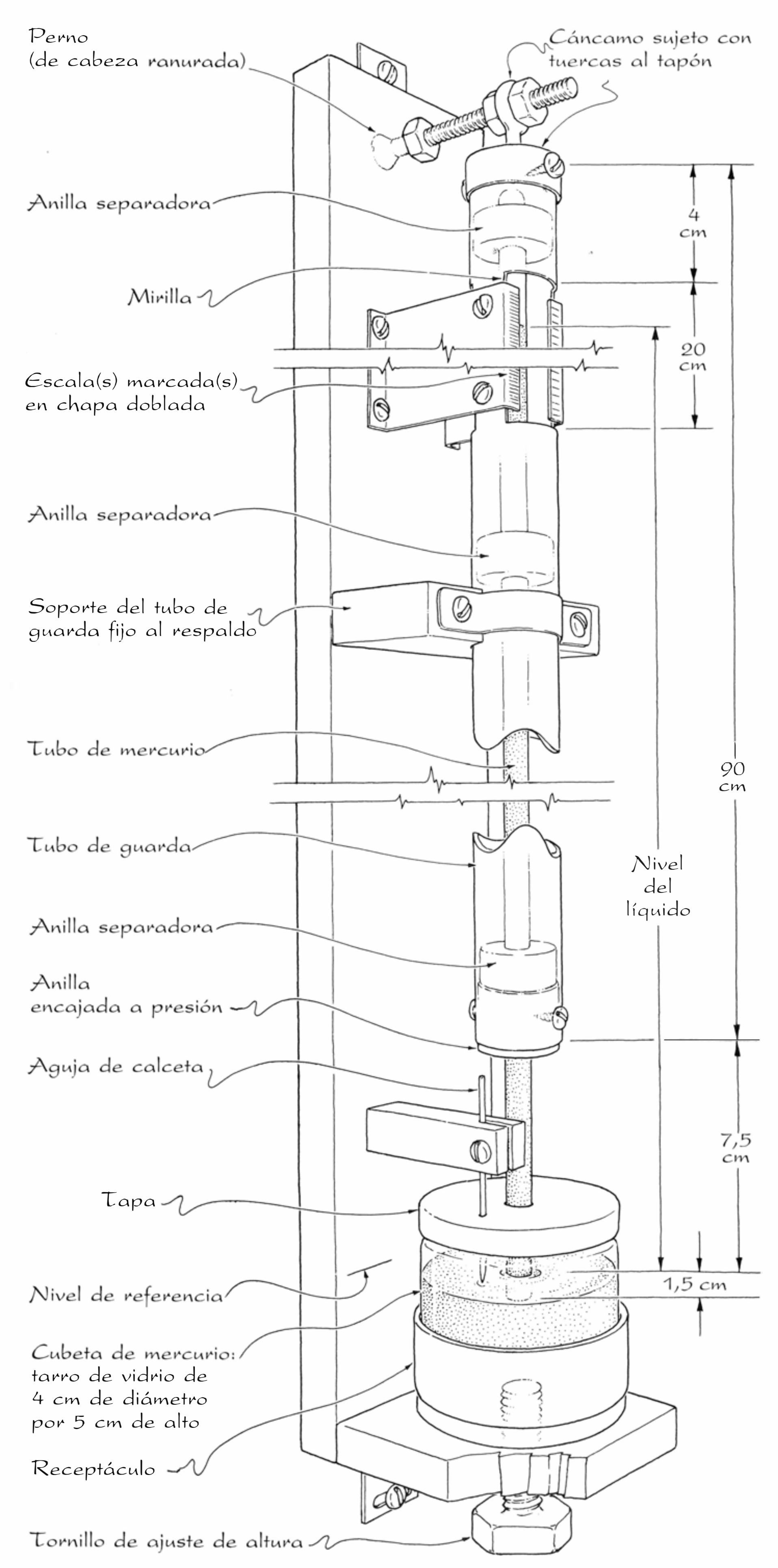
El tubo que encierra el mercurio descansa en un tubo de guarda, hecho de canalización eléctrica de aislante fino con un diámetro interno de unos veinte milímetros. Este tubo de guarda tendrá una longitud aproximada de un metro y dos ranuras de observación junto al extremo superior, a través de las cuales se pueda controlar el nivel de mercurio. A lo largo del costado delantero de este tubo de guarda se coloca una escala graduada en milímetros. Además, la pared situada detrás de las ranuras debe ser blanca, a efectos de contraste con el mercurio. El tubo se cierra por arriba con una tapa que irá provista de un cáncamo en el centro y sujeta al tubo con tres tornillos metálicos.

Del respaldo salen, también, dos soportes para el barómetro. Uno de ellos, de madera, tiene su extremo externo recortado para ajustarse a la base del tubo de guarda. Esta se sujeta al soporte mediante una abrazadera de chapa que la fija ceñidamente a la madera. El otro soporte es un perno de diez milímetros que atraviesa el respaldo, se extiende más allá del barómetro y pasa por el cáncamo. Este último se mantiene en posición mediante unas tuercas atornilladas al perno de soporte.

El tubo del mercurio, de flintglás, tiene noventa centímetros de largo y cinco milímetros de diámetro interno. Por razones de seguridad, Epstein optó por un espesor de pared de un milímetro como mínimo. Cerró uno de los extremos del tubo con un mechero Meker. Para separarlo del tubo de guarda, se valió de tres anillas de madera de 12 milímetros que montó deslizándolas longitudinalmente. Estas anillas presentan un orificio central de un diámetro un poco mayor que el tubo del mercurio. Dos de ellas se pegan con epoxia en sus posiciones del fondo y



4. Barómetro de sifón de Epstein



5. Barómetro calibrador de mercurio de Epstein

centro del tubo; la tercera se fija a unos 11,5 milímetros por debajo del extremo abierto del tubo.

Para llenar el tubo de mercurio, Epstein lo sujetó con abrazaderas de modo que su extremo cerrado quedara abajo. Para recoger el mercurio que pudiera salpicar, dispuso bajo el tubo un recipiente de vidrio de boca ancha con agua hasta un nivel de unos doce milímetros. Tomó asimismo la precaución de llenar el tubo en una habitación sin alfombras; así podría amalgamarlo, en caso de que salpicara, con polvo o limaduras de cobre o cinc humedecidas con vinagre.

Llenó el tubo vertiendo lentamente el mercurio por un embudo sujeto a la boca del mismo con un trozo de tubo de caucho. Para facilitar el flujo del mercurio, introdujo en el tubo, a través del embudo, un trozo de cuerda de piano de unos 120 centímetros. Mientras golpeaba el tubo con un lápiz, hacía subir y bajar lentamente la cuerda, con cuidado para no arañar el vidrio. Procedió así hasta llenar el tubo a un nivel distante unos 25 milímetros del extremo superior y hasta eliminar las burbujas de aire.

Con la colaboración de un ayudante, puso boca abajo el tubo de guarda, apoyando su extremo inferior en una superficie blanda, deslizó por su interior el tubo de mercurio e introdujo, presionando, una anilla de madera en la boca superior del tubo de guarda. Tras deslizar la tapa invertida de la cubeta por el extremo saliente del tubo de mercurio, terminó el llenado de éste. Con la mano protegida con un guante de cirujano, taponó con un dedo el extremo abierto del tubo de mercurio, mientras que, con el concurso de su colaborador, invirtió el conjunto e introdujo el tubo en el mercurio de la cubeta. Retiró el dedo cuando el tubo de mercurio se encontró por debajo del nivel del líquido de la cubeta. Con cuidado para que el extremo inferior del tubo de mercurio no se desplazara por encima del nivel del líquido de la cubeta, ni tocara el fondo de ésta, inmovilizó el tubo de guarda al soporte adosado al respaldo. Seguidamente, tapó el tubo de guarda y ajustó la altura de los tubos hasta que pudo pasar el perno de soporte a través del cáncamo.

Tras roscar a la cubeta su tapa, instaló la aguja de calceta. Para tomar una lectura, debía rotar el perno situado bajo la cubeta hasta que el nivel del líquido de la misma tocaba la punta de la aguja. Leía entonces la altura de la columna de mercurio con una precisión aproximada de un milímetro.

Libros

Pediatría de urgencia, naturaleza en el XVIII*, psicología experimental y física del deporte*

Francesc Asensi, Luis Alonso, José M. Tous y Eusebio Bernabeu

Guía de Urgencias Pediátricas por Delmer J. Pascoe y Moses Grossman. Editorial Labor; Barcelona, 1987. Repetidas veces se ha dicho que ante un caso "urgente" es donde más a prueba se pone la valía profesional del médico. Se trata de tomar una decisión diagnóstica y terapéutica en muy breve espacio de tiempo, en ocasiones instantáneamente, sin apenas poder consultar nada, dependiendo en muchos casos el pronóstico e incluso la vida del paciente del acierto o error de tal decisión. Esto, que es verdad en todos los casos, lo es especialmente cuando el paciente es un niño, con un organismo particularmente vulnerable a multitud de noxas y una limitada capacidad de expresión acerca de sus dolencias y de las circunstancias en que aparecieron.

"Urgente" no es siempre sinónimo de "grave". La consideración de un caso como "urgente" lleva siempre un componente subjetivo. Todos los que trabajamos en servicios de urgencias de hospitales pediátricos vemos a diario multitud de niños traídos por unos angustiados padres que exigen una atención inmediata a su hijo, el cual, a los ojos del pediatra, presenta tan sólo una afección banal. El caso contrario es más raro, pero también se da: padres confiados que traen a su hijo para un control rutinario se ven sorprendidos y alarmados ante la importancia que da el médico a determinados síntomas y la rapidez con que éstos le llevan a actuar.

Todo esto ha sido tenido muy en cuenta por los autores de *Quick Reference to Pediatric Emergencies*, los profesores Pascoe y Grossman al frente de un grupo de 43 colaboradores, en su mayoría del Hospital Clínico de la Universidad de California y del Hospital General de San Francisco, que en su tercera edición ha sido vertida al castellano por la Editorial Labor con el título de *Guía de Urgencias Pediátricas*.

Efectivamente, como muy bien se ha traducido, se trata de una "guía", una orientación para el pediatra que ha de verse en situaciones como las mencionadas. No es un "tratado" con detenidas explicaciones fisiopatológicas y multitud de alternativas terapéuticas, que sería muy útil para las horas de estudio sosegado, pero que en el Servicio de Urgencias haría perder un tiempo precioso en la búsqueda de una solución inmediata al problema concreto.

La obra está dividida en 95 escuetos capítulos dedicados a la práctica totalidad de los problemas con los que se ha de enfrentar el pediatra de los servicios de urgencia, valorando sus aspectos etiológicos, fisiopatológicos, diagnósticos y terapéuticos. La bibliografía que se incluye al final de cada capítulo es asimismo escueta, reducida a contribuciones verdaderamente decisivas en cada tema.

Los tres primeros capítulos están dedicados a una serie de útiles generalidades sobre la atención a las urgencias pediátricas tanto en el hospital como en la etapa pre-hospitalaria. Posteriormente, y en diez grandes apartados, se pasa revista a las urgencias cardio-pulmonares, a los accidentes, envenenamientos y lesiones ambientales, a las urgencias neurológicas, a la terapéutica hidroelectrolítica, a las urgencias endocrinas, metabólicas y hematológicas, a los órganos de los sentidos, a las enfermedades infecciosas, a las urgencias del recién nacido y a las urgencias psico-sociales. A continuación figuran una serie de apéndices sobre procedimientos diagnósticos y terapéuticos, incluyendo un completo listado de medicamentos útiles en urgencias pediátricas con sus dosis, vías de administración y particularidades. Termina el libro con un completo índice alfabético de las materias tratadas, muy útil en libros de este tipo porque ayuda a localizar rápidamente el tema que interesa.

La versión castellana es muy aceptable. Sin embargo se echan en falta dos detalles que hubieran supuesto una sustancial mejora. En primer lugar ampliar la tabla de medicamentos con un listado completo de nombres comerciales y laboratorios fabricantes que los ponen en el mercado farmacéutico español. En segundo lugar completar (o sustituir) el apéndice *G*, dedicado a los aspectos legales de la atención de urgencia. De acuerdo con la versión original éstos se refieren exclusivamente a la legislación de los Estados Unidos.

Evidentemente, estos detalles no suponen impedimento alguno para calificar a la *Guía de urgencias pediátricas* de Pascoe y Grossman de libro excelente y digno de figurar en todos los servicios de urgencias pediátricos como obra de consulta inmediata. Asimismo, resulta de suma utilidad para médicos generales, pediatras de ambulatorios, personal de enfermería pediátrica en los servicios de urgencia y muy particularmente para los médicos internos y residentes en pediatría y en medicina familiar. (F. A.)

La Tierra Esquilmada. Las Ideas sobre la Conservación de la Naturaleza en la Cultura Española del Siglo XVIII, por Luis Urteaga. Serbal/CSIC, 1987. Bien presentada, profusamente ilustrada y de título atractivo. Desgraciadamente, poco más. La obra se articula en dos partes, dedicada la primera a la explotación pesquera y la conservación del mar y, a las ideas sobre el bosque, la segunda. Se abre con una introducción en torno al concepto de la naturaleza y su explotación en el XVIII y termina con una conclusión recapituladora.

Desde la primera página de la introducción se advierte que el autor no es biólogo; obviamente, no es condición necesaria para escribir un buen libro. Tampoco es historiador de la biología; ésta sí que es premisa obligada para adentrarse con solvencia en la exposición de las ideas que se propone relatar. No es teólogo, a pesar de haberse empeñado en develar imaginarias divinizaciones. E investigar la noción de naturaleza sin cierto bagaje filosófico puede resultar tan insólito como citar a Santo Tomás por referencias de un artículo del Espasa o a Empédocles por una traducción al castellano de una alusión en inglés, que es lo que aquí ocurre.

El biólogo se sentirá incómodo, no sólo con lo que entiende el autor por ecología, sino también con las palabras que usa para describirla ("la percepción bastante clara de los lazos que vinculan a los organismos entre sí, y a éstos con el medio ambiente físico [atmosférico, edafológico y botánico]"). Antes de reponerse de esa guinda, se enterará de la existencia de "estrechos lazos de solidaridad que vinculan a animales y plantas", para rematar: "hoy diríamos biocenosis". Quedará frustrado el teólogo que espere objeciones

contra el concepto de naturaleza y sus ramificaciones iusnaturalistas que la escuela de Salamanca va enhebrando a raíz de la nueva situación americana. Urteaga sentencia: "Y la teología es, desde la época medieval, un marco complejo, confuso y contradictorio". No busque el lector otros apoyos para tamaño exabrupto, ya es significativo el pleonasmo de "santos cristianos de nuestra era".

Cambiemos de paralelo, y vayamos al Norte. ¿Se puede abordar con seriedad la influencia del providencialismo en la noción de naturaleza sin manejar la *Nemesis divina* de Linneo o sin tener un conocimiento directo del *The Wisdom of God manifested in the Works of the Creation*, de John Ray? ¿Qué aval histórico tiene lo que se escribe sobre la idea de naturaleza en Rousseau cuando lo afirmado se corrobora con una etérea referencia al *Emilio*, si hasta los principiantes saben que debe distinguirse entre *nature, loi naturelle* y *nature humaine*, según se esboza en el *Discours sur l'origine et les fondements de l'inégalité parmi les hommes* y *Du contrat social*?

La historia de la biología no sale mejor parada. ¿A qué Jussieu alude el autor? Hay tres célebres en el XVIII. Boutelou se metamorfosea, siempre que es mencionado, en Boteleu. Quizá convenga recordar que tampoco es un apellido irrelevante para el tema: "y según las prácticas establecidas por mi padre y abuelos, que por más de un siglo han estado encargados de los Reales Jardines de Aranjuez y de San Ildefonso" (Claudio Boutelou, *Tratado de la huerta*, 2.ª ed., Madrid, 1813). Aldrovandi viene con ese nombre y con el de Aldobrando. Galeno rejuvenece quince siglos: "tiene muy en cuenta las aportaciones de la cultura renacentista, representada por celebridades como Gesnero, Galeno, Aldrovandi...". Dice Urteaga que en el XVIII los botánicos herborizan en las tierras más alejadas de Europa. La verdad es que se venía haciendo desde el XVI: "où beaucoup de belles plantes étrangéres ont été soigneusement enfermées et fixées par les très savant monsieur Leonhart Rauwolff... Il les a cueillies non seulement en Piémont, près de Nice, et en Provence, près de Marseille, mais encore en Syrie, sur le Liban et l'Anti-Liban, en Arabie... (sigue enumerando lugares del Próximo y Medio Oriente)... Dans les années 1573, 1574 et 1575". (En Ludovic Legré, *Léonard Rauwolff. –Jacques Raynaudet*, Marseille, 1900.) Quer se encuentra con el raro privilegio de verse implicado en tres ocasiones, y las tres mal: "Entre ellas –amistades de Sarmiento– hay que citar al gran botánico Joseph Quer, para el que escribió una *Dedicatoria* en su obra la *Flora española e historia de las plantas que se crían en España* (1762)." Así, en la página 57. Concedamos que el trueque de conjunciones en el título sea un error contumaz de imprenta –*Flora española, o historia*... comienza el título correcto; la única dedicatoria que aparece al comienzo de la obra es de Quer al Rey, y lo que sí se lee es una carta del monje cisterciense Antonio Joseph Rodríguez. La *Flora* consta de cuatro volúmenes, el último publicado "a pocos meses de verificada su muerte" (es decir, en 1764), el quinto y sexto llevan por título *Continuación de la Flora Española*, bajo la dirección de Gómez Ortega.

La parte primera hubiera ganado en perspectiva histórica con la respuesta que Juan Salvador, boticario de Barcelona, envió a la Academie Royale des Sciences de París ante el cuestionario que ésta le remitió sobre puntos tan pertinentes como tipo de pesca, artes empleadas, transformación y comercio, especies principales, estacionalidad y otros aspectos de la pesca en Cataluña. Completaría en el Levante lo expuesto sobre Galicia.

La parte segunda mejoraría con el propio manejo de las fuentes que recoge la bibliografía. En el *Semanario de Agricultura y Artes*, número 6, página 95, hay una exposición hermosísima de la función absorbente de "los miasmas o exalaciones fétidas" por parte de los árboles, casi treinta años antes que la de Blas Llanos. Amén de una atinada descripción de la fotosíntesis, cuya paternidad es de Stephen Hales. Priestley, "Ingenhouz" y "Sennebief", como transcribe el *Semanario*, la desarrollaron. ¿Habrá que agregar la célebre memoria de Antonio Martí Franqués sobre los gases y la respiración de las plantas? Evidentemente, la historia de la idea de naturaleza en el XVIII español está por escribir. (L. A.)

PSICOLOGÍA EXPERIMENTAL. I METOLOGÍA, por Santiago Pereda. Ediciones Pirámide; Madrid, 1987. El presente tratado de psicología experimental se nos anuncia como el primero de una serie de libros de texto dirigidos a los alumnos de psicología que el autor enumera en el prólogo: I Metodología, II Manual de Laboratorio, III Comentarios de Texto (lecturas) y Prácticas, IV Aplicaciones. Dada la orientación, explícitamente didáctica de toda la obra propuesta, parece pertinente hacer algunas consideraciones previas sobre el título y contenidos específicos de este primer volumen. El índice de esta *Psicología Experimental* no incluye, en absoluto, ningún epígrafe de los que acostumbran a estar presentes en los índices de los grandes tratados de psicología experimental, que suelen ser los contenidos de la psicología obtenidos mediante la utilización de la técnica experimental. Insiste, reiterativamente, en todos los epígrafes que integran los programas que con tal nombre se cursan en las distintas facultades de psicología españolas.

El problema de los diferentes enfoques y contenidos de la psicología experimental ha llevado a que en la actualidad la misma esté presente en el área de conocimientos de psicología básica, según las teorías y modelos elaborados mediante la técnica experimental; en el área de conocimientos de personalidad, evaluación y tratamientos psicológicos, conforme a su utilización en los estudios causales a partir de los estudios descriptivos de las diferencias individuales, constituyendo la aplicación cabal del método científico natural en psicología, y, en el área de conocimientos de metodología, según su descripción como estrategia específica de investigación y su fundamentación en técnicas estadísticas aplicadas.

El libro está organizado con un prólogo del mismo autor, veinticuatro capítulos, dos anexos y una bibliografía. Todos los capítulos han sido redactados por el autor del libro, a excepción del capítulo veinticuatro escrito por José Luis González Almendros. La homogeneidad expositiva es, pues, una característica constante a lo largo de toda la obra que produce el sorprendente efecto de conferir igual importancia a la redacción del informe de una investigación (cap. 10) que a la adquisición de conocimientos y habilidades acerca del diseño (cap. 11). Resultando además, de esta postura, ingenuamente descriptiva, una identificación entre investigación y diseño que le lleva a reducir el concepto de investigación (cap. 12 y 13) a la noción de experimento (cap. 14 al 24). Quizá la confusión reinante en los dos primeros capítulos del libro acerca del método científico nos ayude a explicar algo más lo que hemos denominado "postura ingenuamente descriptiva". En el primer capítulo se pretende distinguir el método científico de otros métodos de oscuro origen en la filosofía de la ciencia como el llamado "método de la autoridad" por el autor, posiblemente referido al argumento de autoridad, y del método racionalista, sin caer en la cuenta, entonces, de que el método utilizado por Galileo no cabría en ninguno de los mé-

todos propuestos por tratarse de un método que según este investigador está basado tanto en la razón como en la experiencia.

En el segundo capítulo se distingue entre métodos descriptivos, correlacionales y experimentales, no quedando explícita la base en la cual se asienta el resultado de esta nueva taxonomía. Hasta el presente la mayoría de los investigadores estamos convencidos de que el método científico se manifiesta a través de dos tipos de estudios: el descriptivo, que abarca más del ochenta por ciento de los conocimientos disponibles en todas las ciencias factuales conocidas, y el causal, que abarca como máximo el veinte por ciento restante. Entendemos que dentro del estudio descriptivo debe y puede diferenciarse entre la categorización monotética de los fenómenos y la ordenación politética de los mismos, que adquiere su máxima expresión mediante la técnica del análisis factorial, basado en las correlaciones entre los datos registrados, procedan éstos de la observación de actos de conducta a partir de tests objetivos o de tendencias de conducta a partir de las respuestas verbales a test verbales.

Al no considerar el autor la distinción entre estudios descriptivos y causales, sitúa el método experimental como un apartado de lo que denomina "métodos inductivos de investigación". Este planteamiento pone de manifiesto la confusión con que aborda los conceptos deductivo e inductivo al intentar relacionarlos con las ciencias factuales. El autor prescinde de que el conocimiento como resultado del método científico puede serlo tanto de las ciencias factuales como de las ciencias formales y, aunque posteriormente fundamentará los diseños en la matemática, no se da cuenta de que esta ciencia, a pesar de poder explicarse de forma inductiva a posteriori, se ha desarrollado casi exclusivamente de forma deductiva. La contradicción explícita a la que se ve abocado el autor consiste en que, con todo y considerar el método experimental dentro de los métodos inductivos de investigación, al describir la técnica experimental (cap. 3) se siente obligado a hablar de hipótesis. Y no sólo esto; dedica, además, un capítulo entero del libro a las hipótesis y a la formulación de las mismas. La correcta relación entre los estudios descriptivos y causales del método científico se fundamenta en la consideración de que el resultado de los primeros constituye el acervo de conceptos que describen la organización disponible de los fenómenos observados en el área de estudio. La naturaleza de estos conceptos es la de constructos teóricos que, por su origen, denominan las supuestas agrupaciones de los datos registrados, convirtiéndose en constructos hipotéticos, ya que estas supuestas relaciones deberán ser probadas experimentalmente si queremos alcanzar un conocimiento causal a partir del conocimiento descriptivo. Así pues, el problema, en una ciencia realmente acumulativa, no puede considerarse de forma general; sino que debe especificarse según se trate de un problema adecuado para un estudio descriptivo o de un problema pertinente para un estudio causal.

Santiago Pereda nos dice en la página 24 que "el científico, en el caso concreto del psicólogo... deberá seguir en su toma de decisiones un proceso de inferencia lógica que respete las normas establecidas por los filósofos de la ciencia", pero en la página 30 del mismo libro encontramos que "vamos a tratar de estudiar el método científico desde el punto de vista de un científico experimental y, más concretamente, desde el punto de vista de un psicólogo experimental y, por supuesto, no lo vamos a hacer desde el punto de vista de un filósofo de la ciencia". Hay posiblemente varias interpretaciones de este contrasentido, pero quizá la más relevante sea la confesión del autor de que no es posible hacer una obra de metodología sin acudir a la filosofía de la ciencia, aunque como en el presente caso ello signifique hilvanar una filosofía de la ciencia "experimental" sin una base sólida y explícita de la obra de los filósofos de la ciencia. Por esta razón nosotros consideramos que este libro de psicología experimental hubiese comprometido menos al autor del mismo de haber sido subtitulado: I. Tecnología, ya que, entonces, podría suprimir los dos primeros capítulos y pasar directamente al tercero del libro. Esto significa que la actual presentación de la obra puede subdividirse en tres grandes apartados: A) Método científico, cap. 1 y 2. B) Tecnología experimental, cap. 3 al 10 ambos inclusive. C) Diseño experimental, cap. 11 al 24. (J. M. T.)

PROBLEMAS DE FÍSICA GENERAL EN UN AÑO OLÍMPICO, por José M. Savirón. Editorial Reverté; Barcelona, 1984. Es este un bello ejemplo de singularidad en la tónica habitual de los –llamémoslos– "libros de física". Su singularidad radica en el objeto de estudio: todos los problemas considerados están relacionados con el deporte. La obra es un tratado de modelado de situaciones físicas, en que los diferentes temas abordados –y admirablemente escogidos y entrelazados– se han tomado de la experiencia inmediata.

Y ello resulta apasionante para el lector, porque le permite explicarse muchas de las reglas empíricas que la práctica del deporte le han ido imponiendo y de otras que ha podido ir coligando de la observación del espectáculo. Para el científico puede resultar aún más atractivo, porque conoce que todo acto de modelación de una situación física no es nunca tarea fácil. Doce temas, en apenas veinticinco páginas, sirven de introducción al desarrollo de los setenta y cinco problemas considerados, todos ellos en relación con diferentes deportes. Las carreras, la escalada, el fútbol y el baloncesto, el lanzamiento de jabalina, el levantamiento de peso, los saltos de longitud y altura y otras muchas actividades deportivas le merecen consideración y análisis; empalmándose unas con otras, y rellenándose con salpicados ejemplos numéricos, sabrosas observaciones sobre reglas oficiales de las federaciones deportivas, etc., que confieren a la obra una amenidad inusual en un libro de física. Realmente la obra es un ejemplo de sencillez y didáctica.

Esta obra es un regalo para el joven estudiante de física y una buena ayuda para los profesores de la materia, así como una necesidad para los estudiosos de la actividad deportiva. Conceptualmente no puedo sustraerme al recuerdo de esta labor de José María Savirón en relación con la profunda obra de Ernest Mach y las originales aportaciones de Vasco Ronchi. Todas ellas tienen en común el intento, más o menos pretencioso, de modelar situaciones físicas de nuestra propia actividad humana y, por ende, de subjetivar la ciencia y de objetivar las funciones del hombre.

Por otra parte, el libro se nos ofrece cuidadosamente editado, con unos claros esquemas y graciosos dibujos del propio autor que le dan cierto aire de informalidad deportiva. En resumen, Savirón aúna una ciencia natural, como es la física, con algo tan natural como es la expresión deportiva. Tarea que, siendo de por sí bella, es también útil. Esta aportación de Savirón habrá de servir para una mejor comprensión y valoración del deporte por los científicos y una admiración y agradecimiento de los deportistas por la ciencia. La unión de ambos en una tarea común podría conducir a una superación de nuestras marcas en el deporte y, por extensión, a una mayor actividad deportiva. (E. B.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ARMAS NUCLEARES DE TERCERA GENERACION

DIRETED ENERGY MISSILE DEFENSE IN SPACE. Ashton B. Carter. Office of Technology Assessment, Oficina de Publicaciones del Gobierno de los Estados Unidos, 1984.

NUCLEAR WEAPONS DATABOOK, VOL. 1: U.S. NUCLEAR FORCES AND CAPABILITIES. Thomas B. Cochran, William M. Arkin y Milton M. Hoenig. Ballinger Publishing Co., 1984.

ENDLESS GENERATIONS OF NUCLEAR WEAPONS. T. B. Taylor en *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 42, n.º 9, págs. 12-15; noviembre, 1986.

NUCLEAR TESTING IS A PANDORA'S BOX. Theodore B. Taylor en *FAS Public Interest Report*, vol. 39, n.º 10, págs. 1-11; diciembre, 1986.

RESPUESTA DE LOS FOTORRECEPTORES A LA LUZ

RESPONSES OF RETINAL RODS TO SINGLE PHOTONS. D. A. Baylor, T. D. Lamb y K.-W. Yau en *The Journal of Physiology*, vol. 288, págs. 613-634; marzo, 1979.

SPECTRAL SENSITIVITY OF SINGLE CONES IN THE RETINA OF *MACACA FASCICULARIS*. B. J. Nunn, J. L. Schnapf y D. A. Baylor en *Nature*, vol. 309, n.º 5965, págs. 264-266; 17 de mayo de 1984.

THE PHOTOCURRENT, NOISE AND SPECTRAL SENSITIVITY OF RODS OF THE MONKEY *MACACA FASCICULARIS*. D. A. Baylor, B. J. Nunn y J. L. Schnapf en *The Journal of Physiology*, vol. 357, págs. 575-607; diciembre, 1984.

LOS SATELITES DE URANO

LOS SATÉLITES DE URANO, NEPTUNO Y PLUTÓN. Robert Hamilton, Brown y Dale P. Cruikshank en *Investigación y Ciencia*, n.º 108, págs. 18-28; septiembre, 1985.

SATELLITES. Joseph A. Burns y Mildred S. Matthews. University of Arizona Press, 1986.

VOYAGER 2 IN THE URANIAN SYSTEM: IMAGING SCIENCE RESULTS. B. A. Smith et al., in *Science*, vol. 233, n.º 4579, págs. 43-64; 4 de julio de 1986.

TERAPIA ANTIVIRICA

ANTIVIRAL AGENTS AND VIRAL DISEASES OF MAN. Dirigido por George J. Galasso, Thomas C. Merigan y Robert A. Buchanan. Raven Press, 1984.

ANTIVIRAL CHEMOTHERAPY AND CHEMOPROPHYLAXIS. Rapahel Dolin en *Science*, vol. 227, n.º 4692, págs. 1296-1303; 15 de marzo de 1985.

PROSPECTS OF THERAPY FOR INFECTIONS WITH HUMAN T-LYMPHOTROPIC VIRUS TYPE III. M. S. Hirsch y J. C. Kaplan en *Annals of Internal Medicine*, vol. 103, n.º 5, págs. 750-755; noviembre de 1985.

ENERGIA FOTOVOLTAICA

PHOTOVOLTAICS: SUNLIGHT TO ELECTRICITY IN ONE STEP. Paul D. Maycock y Edward N. Stirewalt. Brick House Publishing Co., 1981.

AMORPHOUS SEMICONDUCTOR TECHNOLOGIES AND DEVICES (VOLS. 2, 6 AND 16 OF JAPAN ANNUAL REVIEWS IN ELECTRONICS, COMPUTERS AND TELECOMMUNICATIONS). Dirigido por Y. Hamakawa. Ohmsha, Ltd., Tokyo, 1982-84.

BASIC PHOTOVOLTAIC PRINCIPLES AND METHOD. Kenneth Zweibel y Paul Hersch, Solar Energy Research Institute. Van Nostrand Reinhold Company, 1984.

LA RADIACION DEL REINO ANIMAL

A CASE FOR TWO LATE PROTEROZOIC-EARLIEST CAMBRIAN FAUNAL PROVINCE LOCI. Mark A. S. McMenamin en *Geology*, vol. 10, n.º 6, págs. 290-292; junio, 1982.

A COMPARATIVE STUDY OF LOWER CAMBRIAN *HALKIERIA* AND MIDDLE CAMBRIAN *WIWACIA*. Stefan Bengtson y Morris Simon Conway en *Lethaia*, vol. 17, n.º 4, págs. 307-329; 1984.

THE DAWN OF ANIMAL LIFE: A BIOHISTORICAL STUDY. Martin Glaessner. Cambridge University Press, 1985.

CONTINUING WORK ON THE PRECAMBRIAN-CAMBRIAN BOUNDARY. John W. Cowie en *Episodes*, vol. 8, n.º 2, págs. 93-97; junio, 1985.

ACUSTICA DE LAS ANTIGUAS CAMPANAS CHINAS

AN AMAZING DISCOVERY IN CHINESE MUSIC. Lee Yuan-Yuan en *Chinese Music*, vol. 2, n.º 2, págs. 16-17; junio, 1979.

THE MUSIC OF THE ZENGHOU ZHONG. Lee Yuan-Yuan en *Chinese Music*, vol. 3, n.º 1, págs. 3-15; marzo, 1980.

ANCIENT CHINESE TWO-PITCH BRONZE BELLS. Ma Cheng-yuan en *Chinese Music*, vol. 3, n.º 4, págs. 81-86; vol. 4; n.º 1, págs. 18-20; vol. 4, n.º 2, págs. 31-36; diciembre, 1980-junio, 1981.

EL GEN DE LA HISTONA *H*1

HISTONE GENES STRUCTURE, ORGANIZATION & REGULATION. Dirigido por G. S. Stein, J. L. Stein y W. F. Marzluff. John Wiley & Sons, 1984.

ORGANIZATION OF THE HISTONE GENES IN THE RAINBOW TROUT (*SALMO GAIRDNERII*). W. Connor, J. Mezquita, R. J. Winkfein, J. C. States y G. H. Dixon en *Journal of Molecular Evolution*, vol. 20, págs. 227-235; 1984.

ORGANIZATION AND NUCLEOTIDE SEQUENCE OF RAINBOW TROUT HISTONE H2A AND H3. W. Connor, J. C. States, J. Mezquita y G. H. Dixon en *Journal of Molecular Evolution*, vol. 20, págs. 236-250; 1984.

AN H1 HISTONE GENE FROM RAINBOW TROUT (*SALMO GAIRDNERII*). J. Mezquita, W. Connor, R. J. Winkfein y G. H. Dixon en *Journal of Molecular Evolution*, vol. 21, págs. 209-219; 1935.

HISTONE H4 AND H2B GENES IN RAINBOW TROUT (*SALMO GAIRDNERII*). R. J. Winkfein, W. Connor, J. Mezquita y G. H. Dixon en *Journal of Molecular Evolution*, vol. 22, págs. 1-19; 1985.

JUEGOS DE ORDENADOR

POLYPHONIC COMPOSITION. Owen Swindale. Oxford University Press, 1962.

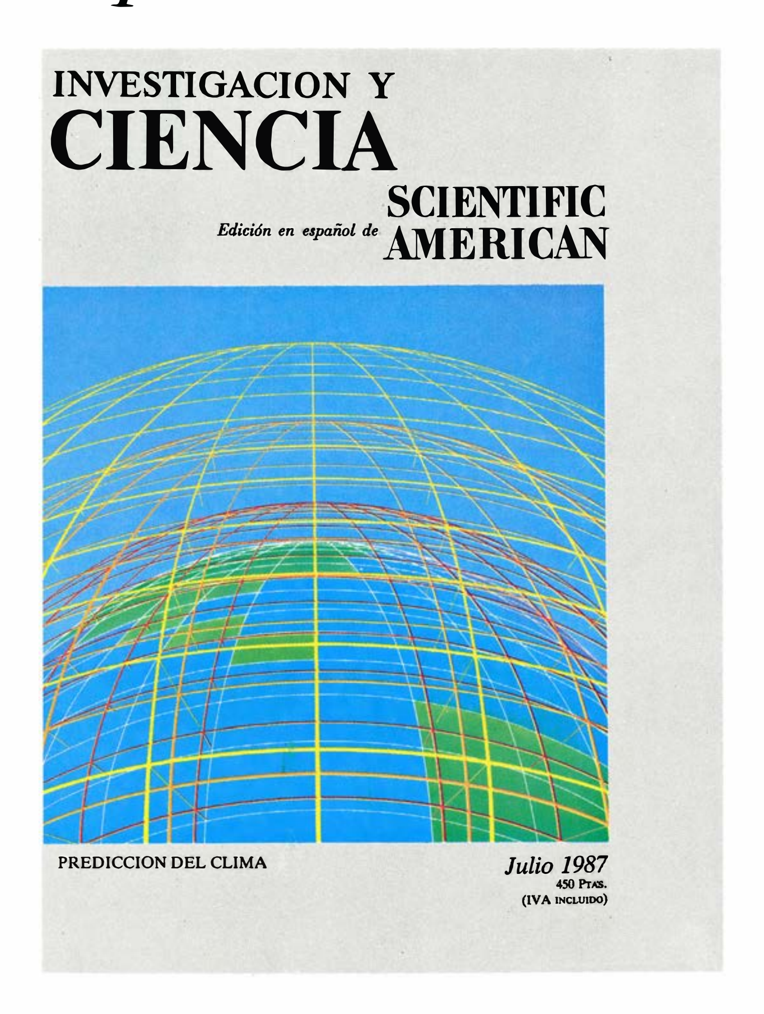
STUDIES FOR THE CONTEMPORARY DRUMMER. John Xepoleas y Warren Nunes. Hansen House, 1981.

COMPUTERS AND MUSIC. Número especial de *Byte*, vol. 11, n.º 5; junio, 1986.

TALLER Y LABORATORIO

THE HISTORY OF THE BAROMETER AND ITS USE IN METEOROLOGY. W. E. Knowles Middleton. The Johns Hopkins Press, 1964.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



SINTESIS COSMICA DE LITIO, BERILIO Y BORO, por Victor E. Viola y Grant J. Mathews
Esos tres elementos ligeros, que no pueden resistir el agresivo entorno estelar donde nace la mayoría de los elementos, se crean cuando los rayos cósmicos chocan contra nubes de gas y polvo de baja densidad.

LAS SINAPSIS QUE COMPUTAN EL MOVIMIENTO, por Tomaso Poggio y Christof Koch
¿Cómo procesan las neuronas la información que reciben del medio? El estudio de las células que, en el ojo, interpretan el movimiento puede definir el mecanismo implicado en otros procesos nerviosos.

MODELOS CLIMATICOS, por Stephen H. Schneider
¿Provocará el "efecto invernadero" una sequía generalizada? ¿Equivaldría una guerra nuclear a un "invierno nuclear"? Los modelos informáticos del clima terrestre ofrecen indicios de su futuro e informan sobre su confuso pasado.

GLUCOSA Y ENVEJECIMIENTO, por Anthony Cerami, Helen Vlassara y Michael Brownlee
Considerado antes biológicamente inerte, el azúcar que más abunda en el organismo puede alterar irreversiblemente algunas proteínas, con lo que contribuye al deterioro que, con la edad, afecta al funcionamiento de las células y los tejidos.

REAPARICION DE LAS FASES, por James S. Walker y Chester A. Vause
A medida que se enfría, la materia se ordena. Sin embargo, algunos sistemas parecen desordenarse de nuevo cuando la temperatura persiste en su descenso. La razón estriba en la interacción de energía y entropía.

DETONACION DE LOS EXPLOSIVOS, por William C. Davis
La detonación avanza por los explosivos cual onda de choque supersónica impulsada por las reacciones químicas que induce la propia onda.

SIMBIOSIS EN LAS PROFUNDIDADES MARINAS, por James J. Childress, Horst Felbeck y George N. Somero
La notable densidad de vida de los humeros abisales se explica por la simbiosis que mantienen los animales invertebrados y las bacterias oxidadoras de sulfuros que colonizan sus células.

LA MIELINA, por Leonardo Mateu
Corresponde a la mielina facilitar el proceso de conducción de impulsos. Cualquier alteración en su estructura o en su estabilidad provoca importantes perturbaciones del sistema nervioso.

